

Universität Stuttgart

Diplomarbeit am ifp

Junyi Tao

Generierung von 3D-  
Oberflächenmodellen aus  
stark überlappenden  
Bildsequenzen eines  
Weitwinkel-Kamerasystems

Betreuer:

Dr. -Ing. Franz Kurz (DLR)

Dr. -Ing. Pablo d'Angelo (DLR)

apl. Prof. Norbert Haala

Prüfer:

apl. Prof. Norbert Haala





---

# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Junyi Tao, dass ich die vorliegende Diplomarbeit mit dem Titel

**Generierung von 3D-Oberflächenmodellen aus stark  
überlappenden Bildsequenzen eines Weitwinkel-  
Kamerasystems**

selbstständig verfasst und hierfür ausschließlich die angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet habe.

Ort und Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

(Junyi Tao)





## Kurzbeschreibung

Rettungskräfte und BOS-Kräfte benötigen aktuelle Informationen während Katastrophen und Großereignissen über die Lage vor Ort. Mit Hilfe von flugzeuggetragener Erfassung der Lage aus der Luft kann den Rettungskräften und BOS Kräften relevante Information schnell geliefert werden. Ein Aspekt sind aktuelle 3D Informationen vom Katastrophen- oder Ereignisgebiets, die für die Dokumentation von Gebäudeschäden oder zur Überwachung von Hangrutschungen aus optischen Aufnahmen abgeleitet werden und den Rettungskräften und BOS Kräften vor Ort zur Verfügung gestellt werden können.

Im Rahmen der Diplomarbeit werden Methoden zur schnellen Generierung von Höhenmodellen aus optischen Luftbildsequenzen analysiert und getestet. Grundlage für die Generierung von Oberflächenmodelle sind Luftbildsequenzen, die mit dem DLR 3K Kamerasystem mit hoher Wiederholrate und aus unterschiedlichen auch schrägen Blickrichtungen aufgenommen worden sind. Die DOMs werden unter Zuhilfenahme der Epipolargeometrie der Bilder durch ein Semi-global matching Verfahren generiert. Aus den zugeordneten sehr dichten Punkten wird dann ein georeferenziertes DOM abgeleitet. Für die Genauigkeitsuntersuchung werden Daten von verschiedenen Kamerasystemen (z.B. DMC, UltraCam) benutzt, um den Algorithmus zur automatische DOM-Generierung zu testen und zu vergleichen.

Die Diplomarbeit wurde im Rahmen des DGPF-Projekts zur Evaluierung digitaler Kamerasysteme und des DLR Projekts ARGOS (Airborne Wide Area High Altitude Monitoring System) durchgeführt.

### ***Schlüsselwörter***

- Digitale Oberflächenmodelle
- 3K-Kamerasystem
- Epipolargeometrie
- Semi Global Matching
- Fusionierung
- DGPF-Projekt
- ARGOS

# Abstract

Rescue workers and BOS forces need current information during disasters and major events concerning the situation on the ground. With the help of airborne detection of the situation, relevant information is delivered quickly from the air forces to the rescue workers and public safety. The aspect is that current 3D information from the disaster area or event, which derived from optical images, is used for the description of damage to buildings or the monitoring of landslides, and furthermore, the rescue forces and BOS forces on the ground can be made available.

In this thesis, methods for the fast generation of elevation models from optical aerial image sequences are analyzed and tested. Basis for the generation of the digital surface models (DSM) are aerial image sequences obtained by the DLR 3K camera system with high repetition rate and acquired from different including slant directions. The DSMs are generated based on the epipolar geometry of the images by a semi global matching approach. From the densely matched points a geo-referenced DSM is then derived. Finally, data acquired by different camera systems (e.g. DMC, UltraCam) are used for accuracy test and comparison of our algorithm with another algorithm for automatic generation of DEM.

The thesis has been accomplished in the progress of DGPF project for the evaluation of digital camera systems and the DLR project ARGOS (airborne Wide Area High Altitude monitoring system).

## **Keywords**

- digital surface model (DSM)
- 3K camera system
- epipolar geometry
- semi global matching
- DGPF-projekt
- ARGOS

# Inhaltsverzeichnis

<b>Selbstständigkeitserklärung</b> .....	<b>III</b>
<b>Kurzbeschreibung</b> .....	<b>V</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Aufgabenstellung .....	1
1.3 Gliederung .....	1
<b>2 DLR-3K-Kamerasystem und Arbeitsumgebung</b> .....	<b>2</b>
2.1 DLR-3K-Kamerasystem.....	2
2.2 Kalibrierung .....	3
2.3 Arbeitsumgebung .....	6
2.3.1 XDibias-Bildverarbeitungssystem .....	6
2.3.2 Shell-Skript, Python .....	8
<b>3 Algorithmus</b> .....	<b>9</b>
3.1 Allgemeines und Flussdiagramm.....	9
3.2 Korrektur der radialsymmetrischen Verzeichnung.....	10
3.3 Generierung der Epipolarbilder.....	13
3.3.1 Epipolargeometrie.....	13
3.3.2 Perspektive Transformation.....	14
3.3.3 Stereonormalfall.....	15
3.3.4 Transformation von Originalbild zum Epipolarbild .....	18
3.3.5 Implementierung und Flussdiagramm für Generierung von Epipolarbilder .....	20
3.4 Semi-Global-Matching-Verfahren .....	21
3.4.1 Allgemeine Matchingsverfahren für dichte Punktzuordnung .....	21
3.4.2 Kurze Vorstellung von Semi-Global-Matching .....	22
3.4.3 Bestimmung der minimalen und maximalen Disparität.....	23
3.5 Räumlicher Vorwärtsschnitt.....	24
3.6 Fusionierung, Interpolation und Darstellung von DOM.....	26
<b>4 DOM Generierung und Auswertung auf dem Datensatz „München Zentrum“</b> <b>28</b>	
4.1 Befliegung.....	28
4.2 Theoretische Betrachtung .....	30
4.2.1 Genauigkeitsuntersuchung .....	30
4.2.1.1 Einfluss der IMU-Messung.....	30
4.2.1.2 Einfluss des Semi-global-matchings .....	31
4.2.2 Untersuchung der Vollständigkeit.....	33
4.3 Praktische Betrachtung für die Bilder aus DLR 3K-Kamerasystem.....	38
4.3.1 Zwischenergebnisse eines Prozess .....	38
4.3.1.1 Laufzeit .....	38
4.3.1.2 Ergebnisse aus einem Bildpaar der Nadirkamera .....	38
4.3.1.3 Ergebnis aus einem Bildpaar der seitwärtsblickenden Kamera.....	42
4.3.2 Absolute Genauigkeit bei unterschiedlicher Basislänge .....	42
4.3.3 Fusionierung von DOMs .....	44

4.3.3.1	Vergleich der Fusionsverfahren .....	45
4.3.3.2	Genauigkeits- und Vollständigkeitsuntersuchung des fusionierten DOMs .....	47
4.4	Analysieren .....	49
4.4.1	Absolute Genauigkeit .....	49
4.4.2	Relative Genauigkeit .....	50
4.4.3	Vollständigkeit .....	50
<b>5</b>	<b>Evaluation der DOMs aus Datensatz Vaihingen-Enz .....</b>	<b>51</b>
5.1	Datensätze .....	51
5.1.1	DMC GSD 20cm .....	51
5.1.2	Ultracam-X GSD 8cm .....	51
5.1.3	3K-Kamera GSD 20cm .....	52
5.1.4	ALS50 .....	52
5.2	Generierungsprozess .....	52
5.3	Analyse und Bewertung der Ergebnisse .....	53
5.3.1	Überblick über das Testgebiet sowie über die Untersuchungsbereiche .....	53
5.3.2	Visuelle Evaluierung in einem Stadtgebiet .....	54
5.3.3	Visuelle Evaluierung eines Sportplatzes .....	58
5.3.4	Genauigkeitsuntersuchungen in ebenem Gelände .....	61
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiel: Erdrutschgebiet in Nachterstedt .....</b>	<b>65</b>
6.1	Tatsache .....	65
6.2	Befliegung .....	65
6.3	Generierung digitaler Oberflächenmodelle: .....	67
6.3.1	3K-Bilder im Erdrutschgebiet .....	67
6.3.2	DOM nach Fusion aus mehreren Bildern .....	67
6.3.3	Orthophoto aus 3K Bilder .....	68
6.3.4	Auswahl der Wasserflächen und Detektion von Ausreißern in generierten DOM .....	69
6.3.5	3D Darstellung des DOMs .....	70
6.4	Vorheriges DOM aus SRTM Daten .....	70
6.5	Vergleich von beiden DOM .....	72
6.5.1	Zusammenstellen .....	72
6.5.2	Vergleich des 3K DOMs mit dem Referenz DOM .....	74
6.5.3	Bildvergleich 2006 gegenüber 2009 in Erdrutschgebiet .....	75
6.5.4	Differenzbild .....	76
6.5.5	Volumen des gerutschten Materials .....	76
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>78</b>
7.1	Zusammenfassung .....	78
7.2	Ausblick .....	79
	<b>Danksagungen .....</b>	<b>80</b>
	<b>Anhang A: Koordinatensystemen und Transformationen .....</b>	<b>81</b>
	<b>Anhang B: Format der Ein- und Ausgabedateien .....</b>	<b>85</b>
	<b>Anhang C: Datenfluss und Programme .....</b>	<b>87</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>91</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>93</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>94</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Rettungskräfte und BOS-Kräfte benötigen aktuelle Informationen während Katastrophen und Großereignissen über die Lage vor Ort. Mit Hilfe von flugzeuggetragener Erfassung der Lage aus der Luft kann den Rettungskräften und BOS Kräften relevante Information schnell geliefert werden. Ein Aspekt sind aktuelle 3D Informationen vom Katastrophen- oder Ereignisgebiets, die für die Dokumentation von Gebäudeschäden oder zur Überwachung von Hangrutschungen aus optischen Aufnahmen abgeleitet werden und den Rettungskräften und BOS Kräften vor Ort zur Verfügung gestellt werden können.

## 1.2 Aufgabenstellung

Im Rahmen der Diplomarbeit sollen Methoden zur schnellen Generierung von Höhenmodellen aus optischen Luftbildsequenzen analysiert und getestet werden. Grundlage für die Generierung von Höhenmodelle sind Luftbildsequenzen, die mit dem DLR 3K Kamerasystem [3] mit hoher Wiederholrate und aus unterschiedlichen auch schrägen Blickrichtungen aufgenommen worden sind.

Spezieller Augenmerk soll in der Diplomarbeit auf Methoden gelegt werden, welche die Epipolargeometrie der Bilder ausnutzen, wie z.B. das Semi-global matching von [13]. Schwerpunkte sind hierbei die Optimierung der Methoden auf Geschwindigkeit und die Fusionierung verschiedener Höhenmodelle, die aus unterschiedlichen Blickrichtungen gewonnen worden sind.

## 1.3 Gliederung

Nach der Einführung im ersten Kapitel, werden im zweiten Kapitel zunächst das DLR 3K-Kamerasystem, dessen Kalibrierung und die Arbeitsumgebung vorgestellt.

Kapitel drei beschreibt detailliert den verwendeten Algorithmus für die Generierung von 3D digitalen Oberflächenmodellen.

Im Kapitel vier werden der Datensatz „München Zentrum“ vorgestellt und die Ergebnisse der DOM-Generierung werden für bzgl. der absoluten Genauigkeit analysiert.

Im Kapitel fünf werden der Datensatz „Vaihingen-Enz“ vorgestellt und die Ergebnisse der DOM-Generierung bzgl. der relativen Genauigkeit analysiert. Gleichzeitig wird der Vergleich der Ergebnisse aus 3K-System und DMC, Ultracam-X und der Vergleich der Ergebnisse aus in diese Diplomarbeit entwickelte Programme und MATCH-T durchgeführt.

Im Kapitel sechs wird ein Anwendungsbeispiel vorgestellt. Während der Diplomarbeit ereignete sich ein heftiger Erdbeben in Nachterstedt in Sachsen-Anhalt. Sechs Tage nach der Katastrophe wurde ein digitales Oberflächenmodell des Erdbebengebiets fertig gestellt.

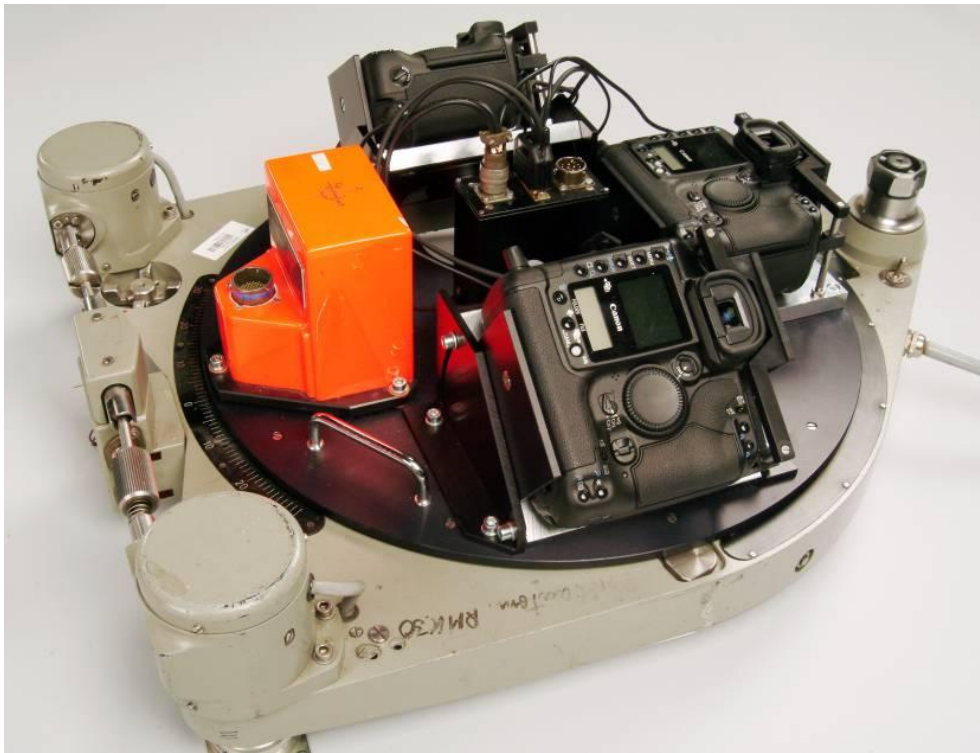
Kapitel sieben bildet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick den Abschluss dieser Arbeit.

## 2 DLR-3K-Kamerasystem und Arbeitsumgebung

### 2.1 DLR-3K-Kamerasystem

Das DLR 3K Kamerasystem ist ein flugzeuggetragenes digitales Nahe-Echtzeit Fernerkundungssystem für die schnelle Kartierung in Katastropheneinsätzen ([2]).

Das System besteht aus drei nicht metrischen Canon EOS 1Ds Mark II Kameras, die in einer Linie auf einer ZEISS-Plattform montiert sind (siehe Abbildung 2.1). Eine Kamera ist in Nadir-Richtung ausgerichtet, die anderen zwei sind seitlich oder in Vor- und Rückblickrichtung ausgerichtet, je nach der Lage der Plattform im Flugzeug. Zusätzlich ist auf der Plattform noch ein IMU-Navigationssystem montiert. Das GPS-System mit Empfänger ist nicht weit entfernt von der Plattform im Flugzeug montiert. Aus der Messungen der beiden Systemen ist die äußere Orientierungsdaten der Bilder abzuleiten und dies ermöglichen damit eine direkte Georeferenzierung der 3K Bildern.



**Abbildung 2.1: DLR 3K-Kamerasystem (Graphik aus [1] entnommen)**

Das Canon EOS 1Ds Mark II Kamera enthält einen CMOS Sensor im Kleinbildformat mit einer Größe von  $24 \times 36 \text{ mm}$ . Die Pixelgröße beträgt  $7.212 \mu\text{m}$ . Jedes Bild enthält dann  $4992 \times 3328$  Pixel. Wegen der Beschränkung des internen Zwischenspeicher auf 165 MB muss die Kamera im kontinuierlichen Aufnahmemodus während des Fluges nach ca. zwanzig Aufnahmen einige Sekunden Pause machen, damit die Daten von einem Kamerainternen Zwischenspeicher zu einer SD-Speicherkarte verschoben werden kann. Falls die Aufnahmefrequenz niedriger als 0.5 Hz ist, ist eine kontinuierliche Aufnahme möglich.

Die Größe eines einzelnen 3K-Bildes beträgt 15MB, zusammen 45 MB. Das Bild kann als JPEG oder im RAM Format gespeichert werden. Nach dem Flug werden die Bilder dann in das Xdibias-Format konvertiert.

Für eine Echtzeit-Prozessierung von den 3K Bildern wurde ein flugzeuggetragenes Bildverarbeitungssystem entwickelt. Fünf Computer sind per Firewire mit den Kameras verbunden. Die verarbeiteten Daten werden mittels einer Mikrowelle Funkverbindung mit einer Datenrate von 3 Mbit/s an eine mobile Bodenstation gesendet und können dort weiter verarbeitet werden. Die Bodenstation (Abbildung 2.2) ist mit dem Internet verbunden, um die Daten für Anwendungen (z.B. Überwachung von Hangrutschen) zur Verfügung zu stellen.



Abbildung 2.2: Die Mikrowelle Antenne (links) und die mobile Bodenstation (rechts) (Graphik aus [3] entnommen)

Die Abbildung 2.3 zeigt die Geometrie der Bildaufnahme von dem 3K-Kamerasystem. Der Zusammenhang zwischen Bodenauflösung, Abdeckungsgebiete und Flughöhe ist anhand von zwei Beispielen dargestellt. Für eine Flughöhe von 1000m z.B. beträgt die Abdeckung 2.8km und die Bodenauflösung 0.15m.

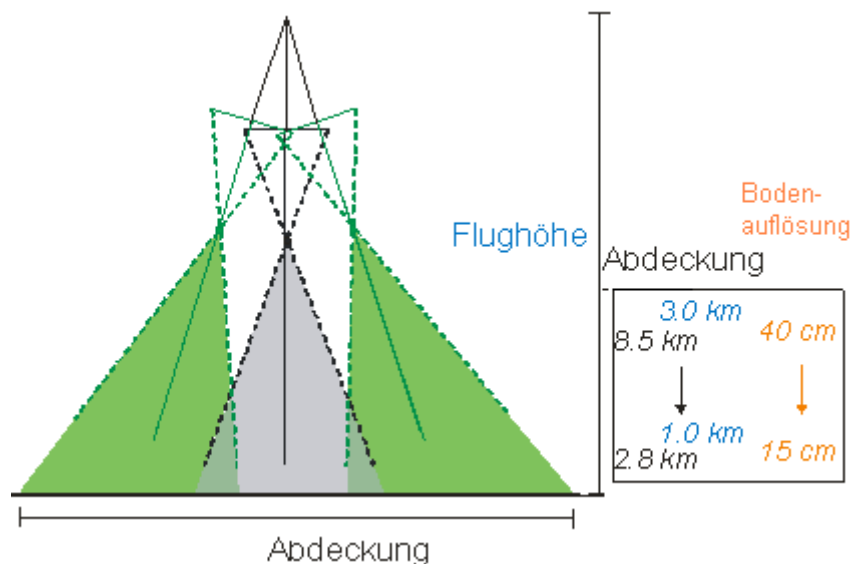


Abbildung 2.3: Die Geometrie der Bildaufnahme (Graphik aus [2] entnommen)

## 2.2 Kalibrierung

Für eine direkte Georeferenzierung ohne Passpunktinformation ist eine Kalibrierung des Kamerasystems sehr wichtig. In 2006 wurden die drei Kameras in einem Bodentestgebiet kalibriert, um die innere Orientierung zu bestimmen. Danach wurden während eines

Bildfluges mittels sogenannter Dreistrahlpunkte und eines speziellen Flugmusters die Boresightwinkel (Einbauwinkel) ohne Verwendung von Passpunkten bestimmt. Die Ergebnisse der Kalibrierung werden detailliert in [1] geschrieben.

Da sich herausstellte, dass die Kamerakonstante für Bodenkalibrierung im Bildflug unterschiedlich als am Boden bestimmt ist, wurde 2008 eine Kalibrierung im Flug in Testgebiet Vaihingen Enz durchgeführt. Mit Passpunkten und GPS-Messungen der Projektionszentren wurde die innere Orientierung und Boresightwinkel mittels Bündelblockausgleichung bestimmt. Die Ergebnisse sind ausführlich in [2] beschrieben.

In diese Diplomarbeit werden nur die Ergebnisse der Kalibrierung im Testgebiet Vaihingen-Enz kurz erläutert.

	Left		Nadir		Right	
	2006	2008	2006	2008	2006	2008
Focal Length $c$ [mm]	51.316	51.476 $\pm 0.001$	50.963 $\pm 0.022$	51.112 $\pm 0.001$	51.156	51.316 $\pm 0.001$
Principal point $y_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	-21.3	-16.5 $\pm 2.3$	-52.0 $\pm 0.6$	-17.6 $\pm 1.8$	7.6	-39.2 $\pm 3.3$
Principal point $x_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	-8.1	-9.1 $\pm 0.4$	-99.2 $\pm 0.8$	-43.9 $\pm 0.4$	2.2	-23.3 $\pm 0.6$
Radial Distortion $A_1$ [ $\text{m}^{-2}$ ]	-57.540	-51.475 $\pm 0.350$	-55.930 $\pm 0.767$	-53.671 $\pm 0.406$	-56.673	-51.902 $\pm 0.061$
Radial Distortion $A_2$ [ $\text{m}^{-4}$ ]	29568.7	23007.0 $\pm 706.7$	28396.5 $\pm 1654.0$	25418.5 $\pm 821.5$	28210.5	22103.7 $\pm 122.5$
Aperture	11.3	7.0	11.3	7.0	11.3	7.0

**Tabelle 2.1: Auflistung der inneren Orientierungsparameter vom Jahr 2006 und 2008 (Tabelle aus [2] entnommen)**

Tabelle 2.1 listet die inneren Orientierungsparameter von der Bodenkalibrierung im 2006 und Flugkalibrierung im 2008 auf<sup>1</sup>. Wegen ähnlicher Umgebung sind nur die Ergebnis vom Bildflug für späteren Flug übertragbar. In der Bündelausgleichung wurden die fünf Parameter als Unbekannte geschätzt. Alle anderen Verzeichnungseinflüsse z.B. die tangentielle Verzeichnung, Verzerrungen und Unebenheiten in der Abbildungsfläche werden nicht in dem Kalibrierungsmodell betrachtet.

In der Bündelblockausgleichung werden auch drei Parameter der äußeren Orientierungsparameter pro Bild Omega, Phi und Kappa bestimmt. Die Differenzen der geschätzten Winkel und der Messwerte vom IMU-Navigationssystem sind dann die sogenannte effektiven Boresightwinkel pro Bild. Die so bestimmte Boresightwinkeln hängen sowohl von der Genauigkeit der Bündelblockausgleichung als auch von der Messgenauigkeit

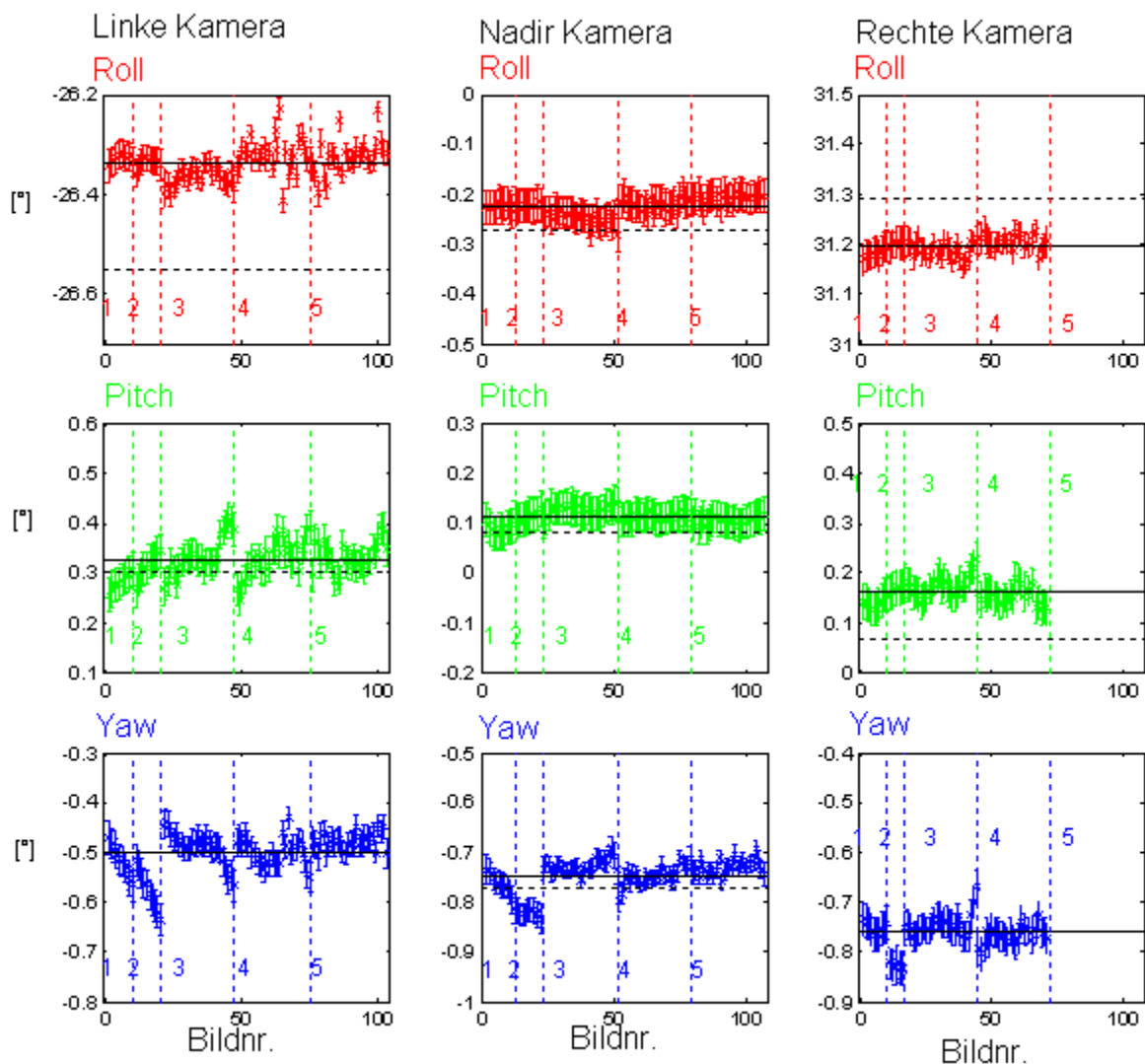
---

<sup>1</sup> Ein direkter Vergleich der Werte ist aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmekonfiguration am Boden und in der Luft v.a. auch wegen der auftretenden Korrelationen problematisch.



des IMU-Systems ab. Die Standardabweichung der Winkelmessung vom IMU-System (IGI IIb) beträgt  $0.01^\circ$  für den Roll- und Pitch-Winkel,  $0.1^\circ$  für den Yaw Winkel ([24]). Die Standardabweichungen der äußeren Orientierungsparameter der Bündelblockausgleichung sind in der Abbildung 2.4 mit senkrechten Fehlerbalken dargestellt.

Die Abbildung 2.4 stellt die effektiven Boresightwinkel Roll, Pitch und Yaw für jedes Bild und für jede Kamera dar. Die Nummern 1 bis 5 bedeuten die fünf Flugstreifen. In der Abbildung ist es zu erkennen, dass innerhalb jedes Flugstreifens es eine deutliche Drift für den Winkel Yaw gibt. Das ist vielleicht darauf zurückzuführen, dass die Messung des Yaw Winkels vom IMU-System systematisch verzerrt ist.



**Abbildung 2.4: Die effektiven Boresightwinkel Roll, Pitch und Yaw für jedes Bild und jede Kamera (Graphik aus [2] entnommen)**

Die Genauigkeit der Boresightwinkel beeinflusst stark die später generierten digitalen Oberflächenmodelle. Die Genauigkeit der generierten Passpunktkoordinaten mit der 3K Kamerasystem ist ca. 35cm horizontal und 50cm in Vertikal Richtung ([2]). Im Vergleich zu den Ergebnissen für andere Kamerasysteme mit höherer Auflösung ([25]), sollte die Kalibrierung des 3K Kamerasystem in der Zukunft noch verbessert werden. Während dieser Diplomarbeit habe ich nur mit den zur Verfügung stehenden Daten gearbeitet.

## 2.3 Arbeitsumgebung

Im vorherigen Abschnitte wird das verwendete Kamerasystem erläutert. In diesem Abschnitt wird kurz auf die Arbeitsumgebung für die photogrammetrische Auswertung eingegangen. Alle in dieser Diplomarbeit verwendeten und entwickelten Programme werden auf einem Linux-System durchgeführt. Das System besitzt einen 64bit Multikernprozessor (Intel Core 2 Duo) mit 1.86 GHz und 2 GB Arbeitsspeicher.

### 2.3.1 XDibias-Bildverarbeitungssystem

In den 1970er Jahren wurde ein Bildverarbeitungssystem Xdibias (Digitales Interaktives Bildauswertesystem, X steht für die X-Windows Umgebung von Unix) vom DLR entwickelt. Das System wird bis heute gepflegt und weiterentwickelt.

Das System besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem Image Administrator und der Visualisierungseinheit IDbias.

Im Image Administrator (siehe Abbildung 2.5) existieren bis heute ca. 300 Prozessierungs Module (Abbildung 2.6). Mit den ständig weiterentwickelten Modulen, sind einfache Operationen wie Verkleinern und Drehen, aber auch komplexe Operationen wie Orthorektifizierung, Matching, DOM-Generierung und Extraktion von Fahrzeugen und deren Geschwindigkeit möglich. Es können Bilder mit einer Quantisierung bis zu 64 bit und 256 Kanälen verarbeitet werden. Zur Konvertierung in andere Bildformate stehen über 40 Import- und Export-Filter bereit.

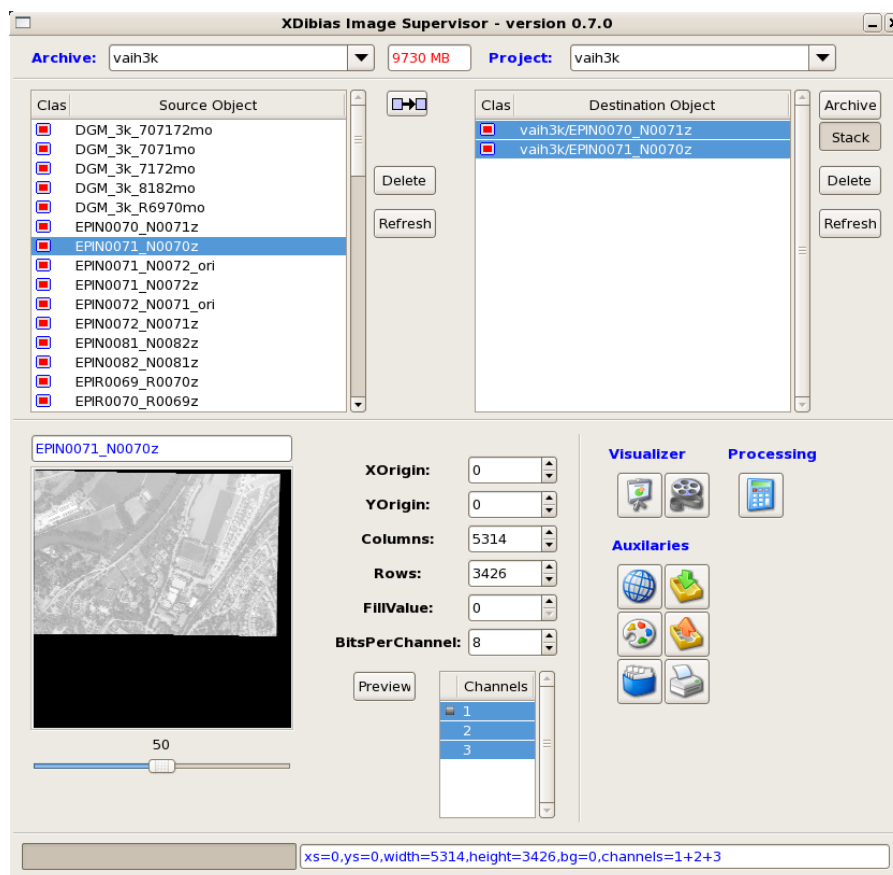


Abbildung 2.5: Der XDibias Image Administrator

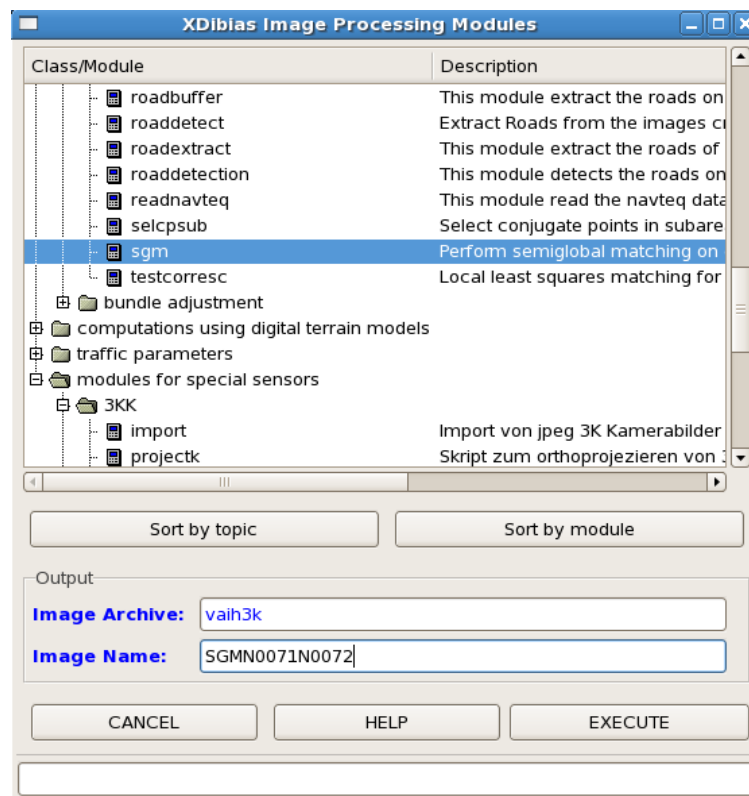


Abbildung 2.6: XDibias Bildprozessierungsmodule

Die Visualisierungseinheit IDbias (siehe Abbildung 2.7) ermöglicht die Darstellung der Daten im XDibias-Bildformat und stellt zusätzlich weitere Operationen wie zum Beispiel die Messung von homologen Punkten im Side-by-Side-Modus (für Kontrollieren der Epipolarbilder wichtig), Vektorverarbeitung und statistische Auswertung zur Verfügung.

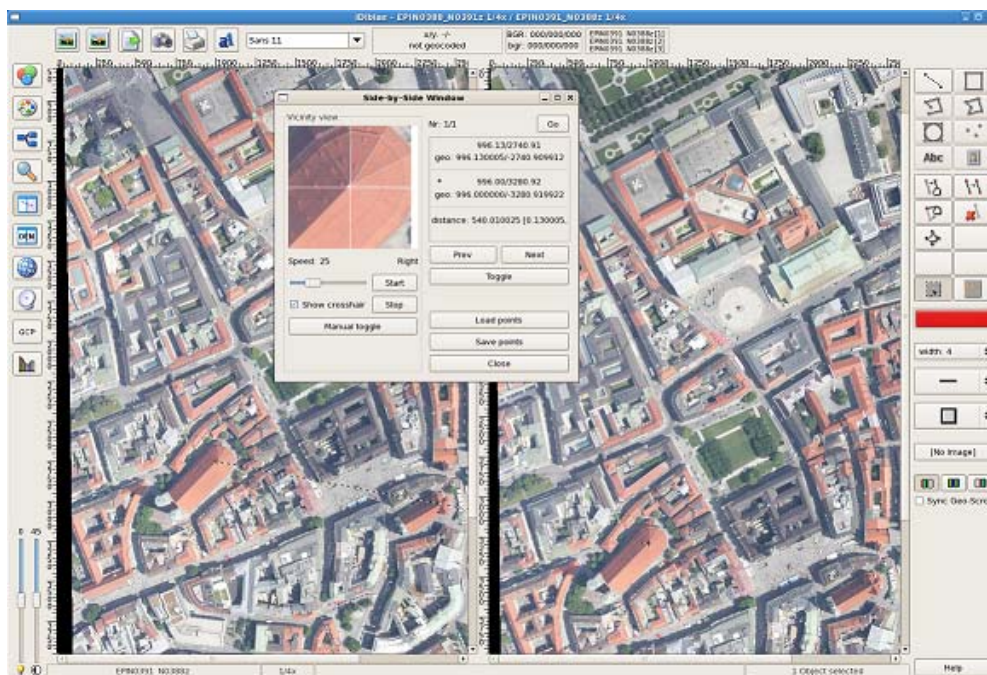


Abbildung 2.7: Die Visualisierungseinheit IDbias

In dieser Diplomarbeit werden folgende Module verwendet:

- dem3dshift: globaler 3D-Versatz zwischen zwei gegebenen Höhenmodellen oder Punktwolken.
- sgmm: Semi-Global-Matching von Epipolarbildern
- interpol: Interpolation eines digitalen Oberflächenmodells aus gegebenen Punkten
- tridim: Erstellen einer 3D-Ansicht

### **2.3.2 Shell-Skript, Python**

Die Auswahl der Module erfolgt sowohl in XDibias Image Administrator als auch in einer Unix-Shell-Skript. In dem Shell-Skript können mehrere Module in einem Batchjob aufgerufen werden. Folgende Programme, die noch nicht im XDibias als Module integriert sind, werden in dieser Diplomarbeit mit Shell-Skript verwendet:

- obko.find.minmax: Auffinden der maximalen und minimalen Werte des Punktwolkendatei
- trafo: Transformation des Bildformats
- rasterobko: Visualisierung eines digitalen Höhenmodells aus gegebenen Punkten

Python ist eine objektorientierte Programmiersprache. Es ist Plattformunabhängig und kann in Windows und Unix durchgeführt werden. Die Programmiersprache stellt sehr viele Bibliotheken zur Verfügung. Die in dieser Diplomarbeit entwickelten Programme werden in Python geschrieben. Die rechenaufwendigsten Teile werden in C geschrieben und in Python Mainprogramm integriert.

## 3 Algorithmus

### 3.1 Allgemeines und Flussdiagramm

Alle in Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelten Programme sind in Python geschrieben. Alle Programme bis auf SGM habe ich selbst geschrieben und zusammen in einem Python-Skript integriert. Die ganze Prozessierung kann automatisch durchgeführt werden. Die einzelne Programme und die Skripte werden auch in XDibias integriert und stehen somit für weitere Anwendungen zur Verfügung.

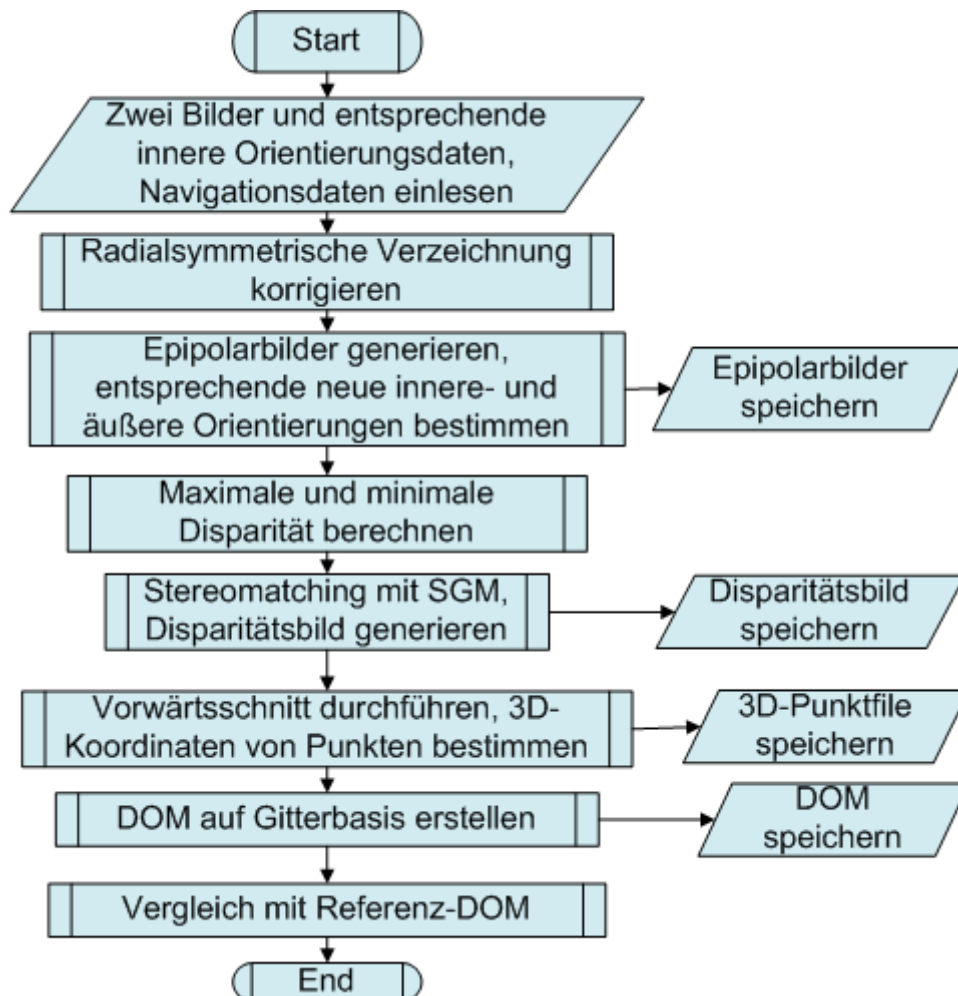


Abbildung 3.1: Flussdiagramm des ganzen Projektes

In der Abbildung 3.1 ist der Aufbau des Programms in einem Flussdiagramm dargestellt. Eingabe des Programms sind zwei Bilder mit entsprechender Kalibrierungsdatei (innere Orientierung, Boresichtwinkeldatei) und Navigationsdatei. Die Bilder werden mit den Kalibrierungsparametern ihre radialsymmetrische Verzeichnung korrigiert. Danach werden Epipolarbildpaare anhand der Epipolargeometrie generiert. Die entsprechende innere- und äußere Orientierung der Epipolarbildpaare werden gespeichert und für weitere Anwendungen zur Verfügung gestellt. Die minimale und maximale Disparität werden geschätzt (siehe Abschnitt 3.4.3), um den Suchbereich des Semi-Global-Matching zu einschränken. Mit XDibias-Modul „sgm“ wird ein Disparitätsbild als Matchingsergebnis generiert. Danach wird räumliche Vorwärtsschnitt durchgeführt, um 3D Koordinaten von

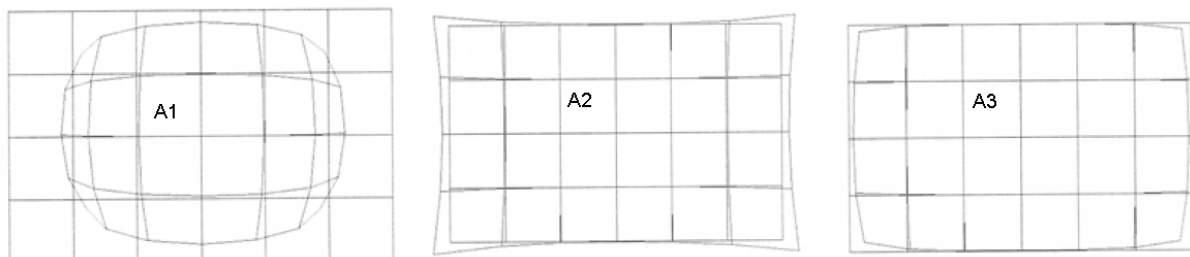
Punkten zu bestimmen. Weiterhin wird das Programm „rasterobko“ aufgerufen, um das DOM aus dem Punktfile zu generieren. Zum Schluss kommen der Vergleich und die Bewertung des generierten DOMs.

### 3.2 Korrektur der radialsymmetrischen Verzeichnung

Die ursprünglichen 3K-Bilder enthalten wegen physikalischer Effekte noch Abbildungsfehler. Die Abbildungsfehler setzen sich aus radialsymmetrische Verzeichnung, tangentielle Verzeichnung, Verzerrung in der Abbildungsfläche und Unebenheit in der Abbildungsfläche [10] zusammen. Für die geplanten Anwendungen überwiegt bei der 3K Kamera die radialsymmetrische Verzeichnung. Diese Verzeichnung führt zur kissen- und tonnenförmigen Verzerrung und wird mit folgender Formel modelliert.

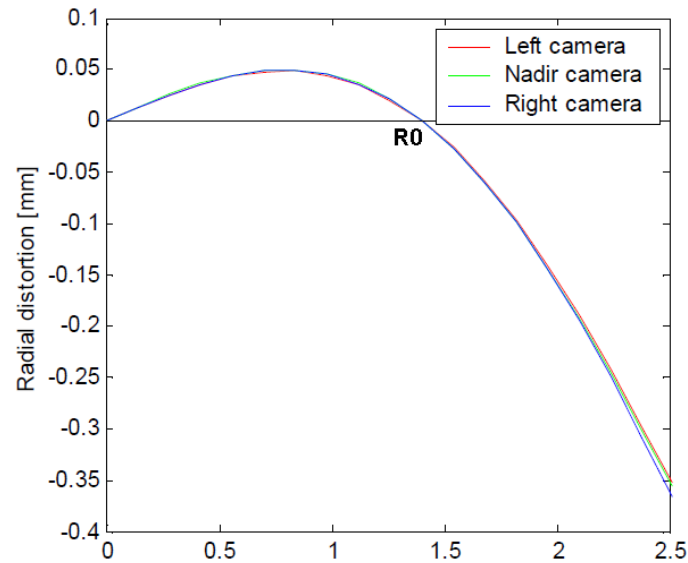
$$\begin{aligned}
 fx &= x - x_0, & fy &= y - y_0 \\
 r &= \sqrt{fx^2 + fy^2} \\
 dx &= [A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6] fx \\
 dy &= [A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6] fy
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Hierbei sind  $x, y$  die Bildkoordinaten,  $x_0, y_0$  sind die Hauptpunktkoordinaten,  $r$  ist der Radius zum Bildhauptpunkt und  $dx, dy$  sind die Korrekturen der radialsymmetrischen Verzeichnung.  $A_1, A_2, A_3$  sind die Parameter der Verzeichnung und haben folgende Auswirkungen:



**Abbildung 3.2: Auswirkung der 3 Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung (Graphik aus [10] entnommen)**

Die Verzeichnung steigt sich monoton mit dem Bildradius. Das führt zu stark unterschiedlicher Korrektur zwischen den Bildmittelpunkte und Bildrandpunkte. Weil eine physikalisch korrekte Verzeichnungskurve numerisch mit der Brennweite korreliert ist, wird in dem benutzten Parametermodell ein linearer Anteil der Funktion abgespalten, wodurch die Kurve einen zweiten Nulldurchgang  $R_0$  erhält. Mit diesem Parameter werden sowohl die Werte für  $A_1, A_2, A_3$  als auch für die Kamerakonstante unabhängig voneinander optimiert. Abbildung 3.3 zeigt die Auswirkung der radialsymmetrischen Verzeichnung und den zweiten Nulldurchgang  $R_0$ . Dabei wird die x-Achse des Diagramms durch die Abstand zum Bildhauptpunkt und y-Achse durch die Verzeichnung definiert. Im zweiten Nulldurchgang gibt es keine radialsymmetrische Verzeichnung.



**Abbildung 3.3: Radialsymmetrische Verzeichnung mit einem zweiten Nulldurchgang (Graphik aus [2] entnommen)**

In der Kalibrierung der DLR 3K-Kamera wird der Parameter  $A_3$  nicht modelliert. Mit  $R_0$  ergibt sich aus Formel (3.1):

$$\begin{aligned}
 fx &= x - x_0 \\
 fy &= y - y_0 \\
 r &= \sqrt{fx^2 + fy^2} \\
 dx &= \left[ A_1(r^2 - R_0^2) + A_2(r^4 - R_0^4) \right] fx \\
 dy &= \left[ A_1(r^2 - R_0^2) + A_2(r^4 - R_0^4) \right] fy \\
 x_n &= x - dx \\
 y_n &= y - dy
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Hierbei sind  $x_n, y_n$  die korrigierten Koordinaten im originären Bildkoordinatensystem. Wegen der Verzeichnung werden die Bildgröße und der Bildmittelpunkt geändert. Die Bildkoordinaten des neuen Bildkoordinatensystem werden dann wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 x' &= x - dx - x_m \\
 y' &= y - dy - y_m
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Hierbei sind  $x_m, y_m$  die Koordinaten des Bildmittelpunktes des neuen Bildes im originären Bildkoordinatensystem, welche mittels 8 korrigierten Randpunkten berechnet werden. Die Abbildung 3.4 stellt die Beziehung zwischen dem originären Bildkoordinatensystem und dem Bildkoordinatensystem nach Korrektur der radialsymmetrische Verzeichnung dar. Die mit grün markierten 8 Randpunkte des ursprünglichen Bildes werden nach obigen Formeln zu den mit blau markierten Punkten transformiert. Anschließend werden die maximalen und minimalen Werte der x und y Koordinaten der 8 korrigierten Punkte berechnet und ein Mittelwert der Maximum und Minimum bestimmt. Diese Mittelwerte sind dann  $x_m, y_m$ .



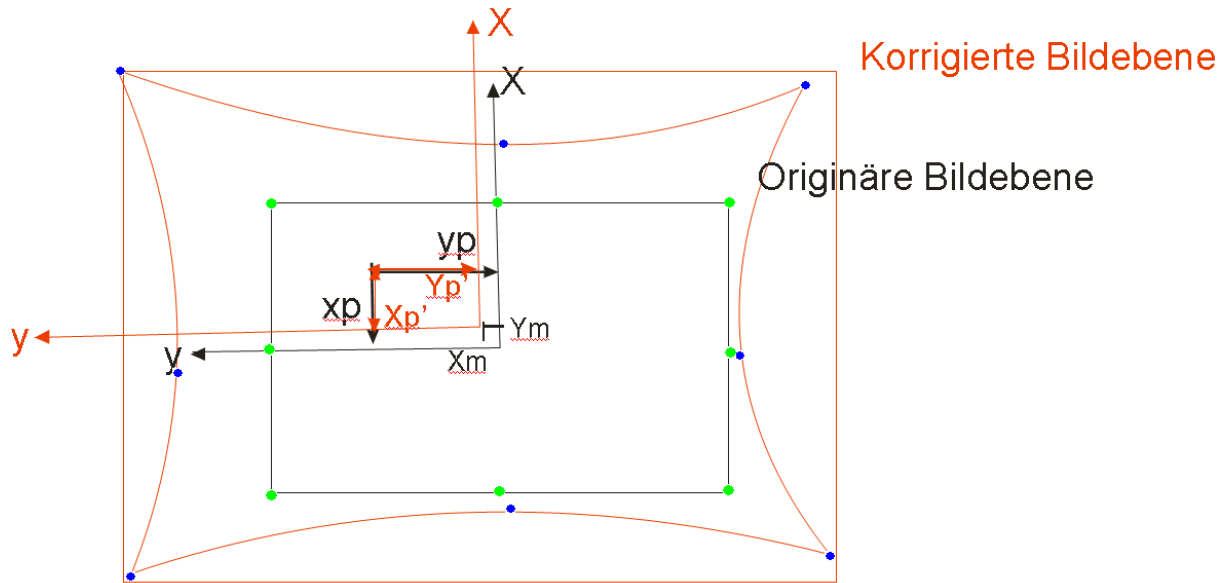


Abbildung 3.4: Radialsymmetrische Verzeichnung

Das Ergebnis diesem Schritt ist ein von der radialsymmetrischen Verzeichnung korrigiertes Bild. Mit obiger Formel kann man die Bildkoordinaten vom ursprünglichen Bild in unverzeichnete Bild transformieren. Die transformierten Punkte liegen normalerweise nicht exakt in einem Pixelzentrum. Bei der Vorwärtstransformation werden alle Pixel des ursprünglichen Bildes den nächstliegenden Pixeln des Zielbildes zugeordnet. Dies führt schließlich dazu, dass in manche Pixel mehrere Grauwerte geschrieben werden und in manche gar keine. Diesen Lücken müssen mit einem Interpolationsverfahren gefüllt werden. Diese Art der Vorwärtstransformation bewahrt alle originäre Grauwerte verfälscht aber ihre Position im Subpixelbereich.

Bei der Rückwärtstransformation werden die Pixel des korrigierten Bildes als Ausgangspunkt betrachtet und ihre entsprechenden Koordinaten im ursprünglichen Bild gesucht. Mittels bilinearer Interpolation wird für jedes Zielpixel ein Grauwert aus den nächsten 4 Pixeln im ursprünglichen Bild berechnet. Diese Strategie verfälscht zwar die Schärfe des Bildes bewahrt aber die Aufnahmegeometrie, was die Genauigkeit des später generierten digitalen Oberflächenmodell stark beeinflusst.

Die Rückwärtstransformation wird in dieser Diplomarbeit verwendet. Dafür ist eine inverse Funktion von neuen Bildkoordinaten zu originären Bildkoordinaten benötigt. Aber die oben gestellte Funktion ist mathematisch nicht invertierbar. In dieser Diplomarbeit werden die Koordinaten mit einem numerischen Verfahren berechnet. Die Formel (3.3) ändert sich zu:

$$\begin{aligned} x &= x' + dx + x_m \\ y &= y' + dy + y_m \end{aligned} \quad (3.4)$$

Hierbei sind  $x_m, y_m$  Konstanten für jedes Bild.  $dx, dy$  sind Funktion von  $x, y$ . Weil  $dx, dy$  und  $x_m, y_m$  sehr klein sind, können  $x', y'$  als Näherungswert für  $x, y$  in der Funktion  $dx, dy$  eingesetzt werden. Danach werden die  $x, y$  neu berechnet. Dieser Vorgang wird iteriert bis die Differenz des Ergebnisses von den letzten zwei Iterationen nicht größer als einen vorher definierten Grenzwert. Ein Beispiel des Ergebnisses ist in folgende Tabelle aufgeführt.



Iteration	Differenz in x-Richtung [Pixel]	Differenz in y-Richtung [Pixel]
1	-4.254	-3.677
2	0.099	0.086
3	-0.002	-0.002

Tabelle 3.1: ein Ergebnis der inversen Funktion für radialsymmetrische Verzeichnung

Der Grenzwert wird 0.01 Pixel definiert und für die meisten Berechnung sind dann 3 Iterationen benötigt.

Für das korrigierte Bild sollten neue Bildhauptpunktkoordinaten berechnet werden. Das neue Bild kann dann als Eingabe für die Generierung von Epipolarbild verwendet werden.

$$\begin{aligned}x'_0 &= x_0 - x_m \\ y'_0 &= y_0 - y_m\end{aligned}\tag{3.5}$$

### 3.3 Generierung der Epipolarbilder

Schwerpunkt der DOM-Generierung ist Bildmatching. Für das in dieser Diplomarbeit verwendete Semi-global Matching Verfahren ist ein Epipolarbildpaar notwendig.

In diesem Abschnitt wird zuerst Epipolargeometrie vorgestellt. Danach wird die grundlegende perspektive Transformation dargestellt, die die Beziehung zwischen Bildkoordinaten und Objektkoordinaten bildet. Weiterhin wird eine spezielle Kamerakonfiguration vorgestellt, die die Eigenschaften des Epipolarbildes erfüllt. Zum Schluss folgt die Transformation von Ursprünglichem Bild zum Epipolarbild.

Der Algorithmus zur Epipolarbildgenerierung ist in [6] genauer beschrieben

#### 3.3.1 Epipolargeometrie

Unter Epipolargeometrie versteht man ein mathematisches Modell aus der Geometrie, das die geometrischen Beziehungen zwischen verschiedene Kamerabildern des gleichen Objekts dargestellt ([23]). Ist der Objektpunkt im ersten Bild gegeben, schränkt sich bei bekannter Epipolargeometrie der Suchbereich im zweiten Bild auf eine Linie ein. In der Abbildung 3.5 ist die Epipolargeometrie dargestellt. Die beide Projektionszentren  $O_1, O_2$  und ein Objektpunkt  $X$  bilden eine Ebene, sogenannte Epipolarebene. Die Epipolarebene schneidet die beiden Bildebenen in zwei Linien  $l_1, l_2$ , den sogenannte Epipolarlinien. Jeder Punkt  $x_1$  auf der Epipolarlinie  $l_1$  hat eine homologen Punkt  $x_2$  auf der andere Epipolarlinie  $l_2$ . Die Basislinie  $O_1O_2$  schneidet die zwei Bildebene auf zwei Punkten  $e_1, e_2$ , den sogenannte Epipolen. Durch ihn laufen alle Epipolarlinien eines Bildes. Er selber kann sich aber je nach Lage der Kameras zueinander außerhalb des eigentlichen Bildes befinden.

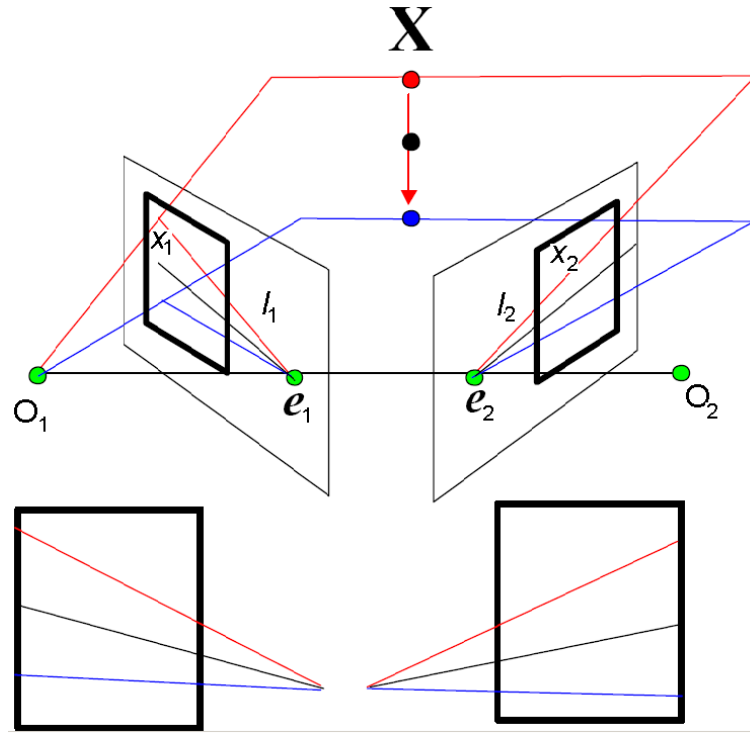


Abbildung 3.5: Epipolarometrie (Graphik aus [8] entnommen)

### 3.3.2 Perspektive Transformation

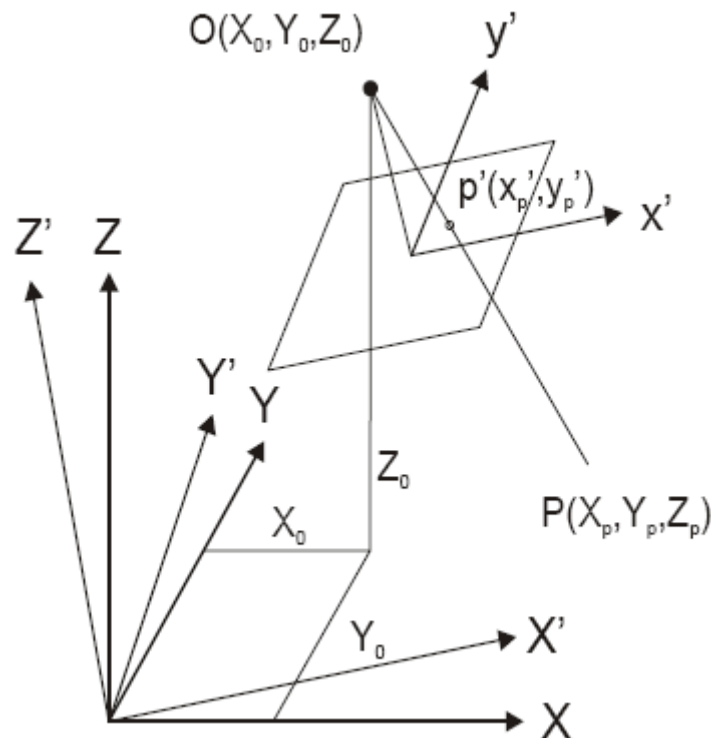
Für jede Bildaufnahme gibt es eine geometrische Beziehung zwischen die Bildkoordinaten und Objektkoordinaten. Diese Beziehung kann man mit einem zentralperspektiven Transformationsmodell darstellen. In [26] wird das perspektive Transformationsmodell auch detailliert erläutert. In Abbildung 3.6 wird die geometrische Beziehung der perspektiven Transformation dargestellt. Diese Transformation kann man mit folgender Formel beschreiben:

$${}^H\tilde{x} = P \cdot {}^H\tilde{X} = \begin{bmatrix} -c & -cs & x_0 \\ 0 & -c(1+m) & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R^T \begin{bmatrix} \tilde{I}_{3 \times 3} & -\tilde{X}_0 \end{bmatrix} \cdot {}^H\tilde{X} \quad (3.6)$$

Wobei  ${}^H\tilde{x} = [x \ y \ 1]^T = [wx \ wy \ w]^T$  die homogenen Koordinaten der Punkte in Bildkoordinatensystem und  ${}^H\tilde{X} = [X \ Y \ Z \ 1]^T = [w_2X \ w_2Y \ w_2Z \ w_2]^T$  die homogene Koordinaten des Objektpunkts in übergeordnetem Koordinatensystem sind.  $P$  ist die Projektionsmatrix.  $\tilde{X}_0 = [X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$  sind die Koordinaten des Projektionszentrums,  $\tilde{R}$  ist die Rotationsmatrix von Bildkoordinatensystem in das übergeordnete Koordinatensystem.  $\tilde{I}$

ist eine Einheitsmatrix,  $K = \begin{bmatrix} -c & -cs & x_0 \\ 0 & -c(1+m) & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  ist die Kameramatrix.  $c$  ist

Kamerakonstante,  $s$  ist der Scherungsparameter,  $m$  ist der Maßstabsunterschied und  $x_0, y_0$  sind die Hauptpunktkoordinaten. Für die 3K Kamera wird die Scherung und Maßstabsunterschied in der Kalibrierung nicht bestimmt. Sie sind in dieser Diplomarbeit dann als 0 eingesetzt. Falls die Bildkoordinaten  $[x \ y \ -c]^T$  sind, also eine negative Kamerakonstante verwendet wird, wird in der Kameramatrix auch  $-c$  eingesetzt werden.



**Abbildung 3.6:** Transformation der Objektkoordinaten  $\vec{X}_p$  vom übergeordneten Koordinatensystem  $\vec{X}$  zum Kamerakoordinatensystem  $\vec{x}'$  (Graphik aus [10] entnommen)

### 3.3.3 Stereonormalfall

Im der Abschnitt 3.3.1 wurde die Epipolarlinie beschrieben. Die Epipolarlinie liegt normalerweise schräg im Bild. Um einen homologen Punkt in dem zweiten Bild zu suchen, sollte man zuerst die Lage der Epipolarlinie bestimmen. Bei einem Epipolarbild liegen alle Epipolarlinien parallel zu Bildzeilen oder Bildspalten, dadurch wird die Suche der Epipolarlinie stark vereinfacht. Das Epipolarbild hat folgende Eigenschaften:

1. Die Epipolarlinien liegen parallel zueinander und in Zeilen oder Spaltenrichtung (in dieser Diplomarbeit werden Epipolarlinien in Spaltenrichtung verwendet), das heißt, das die Epipole in Unendlich liegen.
2. Korrespondierende Epipolarlinien in 2 Bilder liegen in der gleichen Spalte. Die beiden Bilder haben dann gleiche Anzahl von Spalte und ein gleiches  $y_0$ .
3. Die Epipolarbilder sollten möglichst wenig von originärem Bilder abweichen.

Eine spezielle Aufnahmekonfiguration, der sogenannte Stereonormalfall, kann obige Eigenschaften der Epipolarbilder erfüllen. Unter dem Stereonormalfall oder kurz Normalfall versteht man in der Photogrammetrie die Herstellung eines Bildpaares derart, dass die

beiden Blickrichtungen zueinander parallel und gleichzeitig orthogonal zur Verbindung der beiden Aufnahmeorte sind (aus [11]). Im Stereonormalfall aufgenommene Bildpaare haben die Eigenschaft, dass die Epipolarlinien parallel zueinander liegen. Um alle oben genannten Bedingungen der Epipolarbilder zu erfüllen, sollten zusätzlich folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Die Rotationsmatrix  $R$  sollte für beide Epipolarbilder gleich sein und die  $x$ -Achse des neuen Bildkoordinatensystem sollte parallel zu Basislinie liegen.
2. Die Kamerakonstante  $c$ , Pixelgröße, Bildhauptpunktkoordinaten  $y_0$  und Anzahl der Spalte sollten für beide Epipolarbilder gleich sein.
3. Alle neue Parameter der Projektionsmatrix für die Epipolarbilder sollte möglichst wenig von den der ursprünglichen Bildern geändert werden.

In der Abbildung 3.7 ist die Beziehung von der originäre Bildpaare und Epipolarbilder dargestellt. Die schwarz markierten Linien zeigen die Ausrichtungen der originären Bilder. Die rot markierten Linien zeigen die Koordinatensysteme der Epipolarbilder.

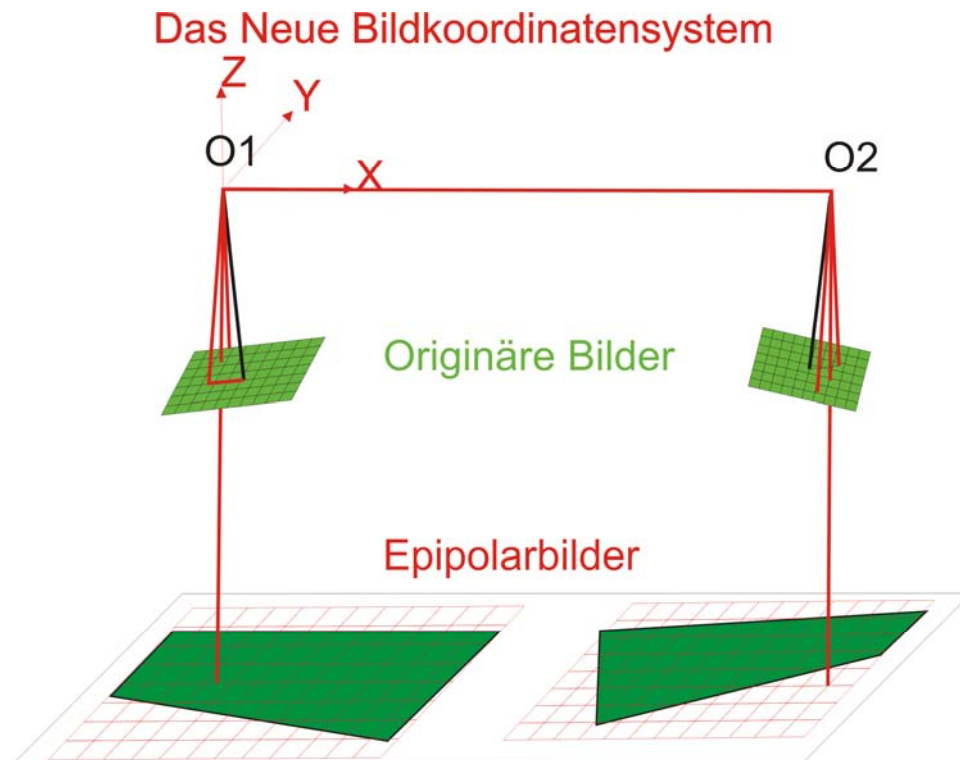


Abbildung 3.7: Beziehung der ursprüngliche Bildpaare und Epipolarbilder

Anhand der Gleichung (3.6) ist die Projektionsmatrix der ursprünglichen Bilder:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= K_1 R_1^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1 & 0 & x_{01} \\ 0 & -c_1 & y_{01} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_1^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_{01} \end{bmatrix} \\
 P_2 &= K_2 R_2^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_2 & 0 & x_{02} \\ 0 & -c_2 & y_{02} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_2^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_{02} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Nach obigen Bedingungen der Epipolarbilder werden die Projektionsmatrix für die beide Epipolarbilder wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned}
 P_{n1} &= K_{n1} R_n^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_n & 0 & x_{n01} \\ 0 & -c_n & y_{n0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_n^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_{01} \end{bmatrix} \\
 P_{n2} &= K_{n2} R_n^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_n & 0 & x_{n02} \\ 0 & -c_n & y_{n0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_n^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_{02} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Das heißt, nur die Hauptpunktkoordinaten in x-Richtung und das Projektionszentrum sind für die beiden Epipolarbilder unterschiedlich.

Um die Epipolarbilder möglichst wenig von originärem Bild zu ändern, werden die Parameter so bestimmt:

$$c_n = (c_1 + c_2) / 2 \tag{3.9}$$

Die Bildhauptpunktkoordinaten  $x_{n01}, x_{n02}, y_{n0}$  hängen von der Größe der Epipolarbilder ab. Sie können zuerst mit Null initialisiert werden. Das bedeutet, dass die Ursprünge der neuen Bildkoordinatensysteme mit Bildhauptpunkt übereinstimmen. Nach der Bestimmung der Bildgröße und Eckpunkte kann man die Bildhauptpunktkoordinaten so ändern, dass die Ursprünge der neuen Bildkoordinatensysteme mit Mittelpunkt des Bildes übereinstimmen.

Die neue Rotationsmatrix  $R_n$ , die die Kameraorientierung beschreibt, wird mit Hilfe von ihren Zeilenvektoren so bestimmt:

$$R_n^T = \begin{bmatrix} r_1^T \\ r_2^T \\ r_3^T \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

Wobei  $r_1, r_2, r_3$  die x, y und z-Achse des neuen Bildkoordinatensystems in Objektkoordinatensystem sind. Gemäß den vorher genannten Eigenschaften der Epipolarbilder werden die Achsen so bestimmt:

Die neue x-Achse ist parallel zu der Basislinie:

$$r_1 = \frac{\vec{X}_{01} - \vec{X}_{02}}{\|\vec{X}_{01} - \vec{X}_{02}\|} \quad (3.11)$$

Die neue y-Achse sollte orthogonal zu x-Achse und zu einem Einheitsvektor  $\vec{k}$  :

$$\vec{r}_2 = \vec{k} \times \vec{r}_1 \quad (3.12)$$

Die neue z-Achse ist orthogonal zu x und y-Achse:

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_1 \times \vec{r}_2 \quad (3.13)$$

Der Einheitsvektor  $\vec{k}$  kann eigentlich frei gewählt werden. Um die beiden Epipolarbilder möglichst wenig von den beiden originären Bildern zu ändern, wird  $\vec{k}$  so bestimmt:

$$\begin{aligned} \vec{k}_1 &= \vec{r}_1 \times (R_{1,3} \times \vec{r}_1) \\ \vec{k}_2 &= \vec{r}_1 \times (R_{2,3} \times \vec{r}_1) \\ \vec{k} &= \left( \frac{\vec{k}_1}{\|\vec{k}_1\|} + \frac{\vec{k}_2}{\|\vec{k}_2\|} \right) / 2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Wobei  $R_{1,3}$  die 3. Spalte der Rotationsmatrix  $R_1$  ist, d.h. die z-Achse des originären Bildkoordinatensystem.  $\vec{k}_1$  liegt in gleiche Ebene von  $R_{1,3}$  und  $\vec{r}_1$ , ist die Projektion von der originäre z-Achse in die orthogonale Ebene von  $\vec{r}_1$ .  $\vec{k}$  richtet dann nach die Richtung der Winkelhalbierende von  $\vec{k}_1$  und  $\vec{k}_2$ . Falls der Unterschied der Orientierung der beiden originären Bilder nicht so groß ist, kann  $\vec{k}$  auch einfach als z-Achse des originären linken Bildes bestimmt. Also  $\vec{k} = R_{1,3}$ .

### 3.3.4 Transformation von Originalbild zum Epipolarbild

Bisher sind die Projektionsmatrizen der ursprünglichen Bilder und der Epipolarbilder bekannt. Es fehlt noch die Transformationsmatrix von ursprünglichem Bild zum Epipolarbild.

Dazu kann man die Formel (3.6) umformulieren:

$${}^H \vec{X} = P \cdot {}^H \vec{X} = KR^T \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_0 \end{bmatrix} \cdot {}^H \vec{X} = Q \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_0 \end{bmatrix} \cdot {}^H \vec{X} \quad (3.15)$$

Die homogenen Koordinaten werden eingesetzt:

$$\begin{bmatrix} w_1 x \\ w_1 y \\ w_1 \end{bmatrix} = Q_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \vec{I}_{3 \times 3} & -\vec{X}_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_2 X \\ w_2 Y \\ w_2 Z \\ w_2 \end{bmatrix} = Q_{3 \times 3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_2 X \\ w_2 Y \\ w_2 Z \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Es gilt dann:

$$\mathcal{Q}_{3 \times 3}^{-1} \begin{bmatrix} w_1 x \\ w_1 y \\ w_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_2 X - w_2 X_0 \\ w_2 Y - w_2 Y_0 \\ w_2 Z - w_2 Z_0 \end{bmatrix} = w_2 \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\vec{X} - \vec{X}_0 = \mathcal{Q}_{3 \times 3}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_2} x \\ \frac{w_1}{w_2} y \\ \frac{w_1}{w_2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Wegen die Eigenschaft von homogenen Koordinaten  ${}^H \vec{x} = [x \ y \ 1]^T = [wx \ wy \ w]^T$ ,  $w \neq 0$  gilt:

$$\vec{X} - \vec{X}_0 = \mathcal{Q}_{3 \times 3}^{-1} {}^H \vec{x} = (KR^T)^{-1} {}^H \vec{x} \quad (3.19)$$

Die Bildpunkt im ursprünglichen Bild und im Epipolarbild haben dann folgende Beziehung:

$$\begin{aligned} \vec{X} - \vec{X}_0 &= \mathcal{Q}_1^{-1} {}^H \vec{x}_1 = (K_1 R_1^T)^{-1} {}^H \vec{x}_1 \\ \vec{X} - \vec{X}_0 &= \mathcal{Q}_{n1}^{-1} {}^H \vec{x}_{n1} = (K_{n1} R_n^T)^{-1} {}^H \vec{x}_{n1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Es gilt dann:

$$\begin{aligned} {}^H \vec{x}_{n1} &= T_1 {}^H \vec{x}_1 \\ T_1 &= \mathcal{Q}_{n1} \mathcal{Q}_1^{-1} = (K_{n1} R_n^T)(K_1 R_1^T)^{-1} \end{aligned} \quad (3.21)$$

$T_1$  ist dann die Transformationsmatrix für die linkere Bild vom ursprünglichen Bild zu Epipolarbild. Gleichfalls gilt für das andere Bild:

$$\begin{aligned} {}^H \vec{x}_{n2} &= T_2 {}^H \vec{x}_2 \\ T_2 &= \mathcal{Q}_{n2} \mathcal{Q}_2^{-1} = (K_{n2} R_n^T)(K_2 R_2^T)^{-1} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Im Abschnitt 3.3.3 werden die Bildhauptpunktkoordinaten  $x_{n01}, x_{n02}, y_{n0}$  als Null in den Kameramatrizen  $K_{n1}, K_{n2}$  initialisiert. Das führt dazu, dass der Ursprung des Bildkoordinatensystems nicht mit dem Bildmittelpunkt übereinstimmt. Um das Problem zu lösen, sollten die Bildhauptpunktkoordinaten neu bestimmt werden.

Mit den beiden Transformationsmatrizen  $T_1, T_2$  werden die 4 Eckpunkte des originären Bildes zu Epipolarbild transformiert. Die dadurch berechneten Koordinaten begrenzen den

Bereich des Epipolarbilds. Der Mittelpunkt des Epipolarbilds wird dann durch den Mittelwert des Maximum und Minimum in x und y Richtung berechnet:

$$\begin{aligned} x_{1m} &= \frac{1}{2} [\max(x_{1i}) + \min(x_{1i})] \\ x_{2m} &= \frac{1}{2} [\max(x_{2i}) + \min(x_{2i})] \end{aligned} \quad (3.23)$$

Da die Hauptpunktkoordinaten in y Richtung gleich sein sollen, sollten für den Mittelpunkt in y-Richtung beide Bilder betrachtet werden:

$$y_m = \frac{1}{2} [\max(y_{1i}, y_{2i}) + \min(y_{1i}, y_{2i})] \quad (3.24)$$

Damit haben die beiden Epipolarbilder die gleich Breite, und korrespondierende Epipolarlinien die gleichen Y-Koordinaten.

Die neuen Bildhauptpunktkoordinaten sind dann  $(-x_m, -y_m)$ . Die Anzahl der Zeilen des Epipolarbildes ist  $2 \cdot \text{ceil}(\max(x_{1i}) - x_{m1} - 0.5)$ , Die Anzahl der Spalten des Epipolarbildes ist  $2 \cdot \text{ceil}(\max(y_{1i}, y_{2i}) - y_m - 0.5)$ .

Die neuen Bildhauptpunkte  $(-x_{1m}, -y_m)$ ,  $(-x_{2m}, -y_m)$  werden in Formel (3.22) eingesetzt, um die Kameramatrix  $K_{n1}$ ,  $K_{n2}$  und Transformationsmatrix  $T_1$ ,  $T_2$  neu zu bestimmen.

Jede Pixel im Epipolarbild wird mit der Matrix  $T_1^{-1}$ ,  $T_2^{-1}$  in das ursprüngliche Bild transformiert und entsprechende Grauwert durch bilineare Interpolation berechnet. Die so generierten Epipolarbilder können direkt für 3D Rekonstruktion verwendet. Die neuen inneren und äußeren Orientierungsparameter werden für spätere Anwendungen gespeichert.

### 3.3.5 Implementierung und Flussdiagramm für Generierung von Epipolarbilder

Die Eingabeparameter für die Generierung von Epipolarbilder sind die Boresightwinkel, die innere Orientierungsparameter und die Navigationsdatei für jedes Bild. Um die Rotationsmatrix von Bildkoordinatensystem zum übergeordneten Koordinatensystem für jedes Bild zu berechnen, wird die letzte Formel in Anhang A verwendet.

Für die Korrektur der radialsymmetrische Verzeichnung und Generierung von Epipolarbilder wird jeweils ein Rasampling benötigt. Um die originalen Bilder möglichst unverfälscht zu nutzen, werden die beiden Schritte in einem Schritt zusammengefasst. Das heißt, die idealen Bildkoordinaten werden radial-korrigiert und alle folgenden Berechnungen beziehen sich auf das Originalbild.

In Abbildung 3.8 wird ein Flussdiagramm für die Generierung von Epipolarbilder dargestellt.



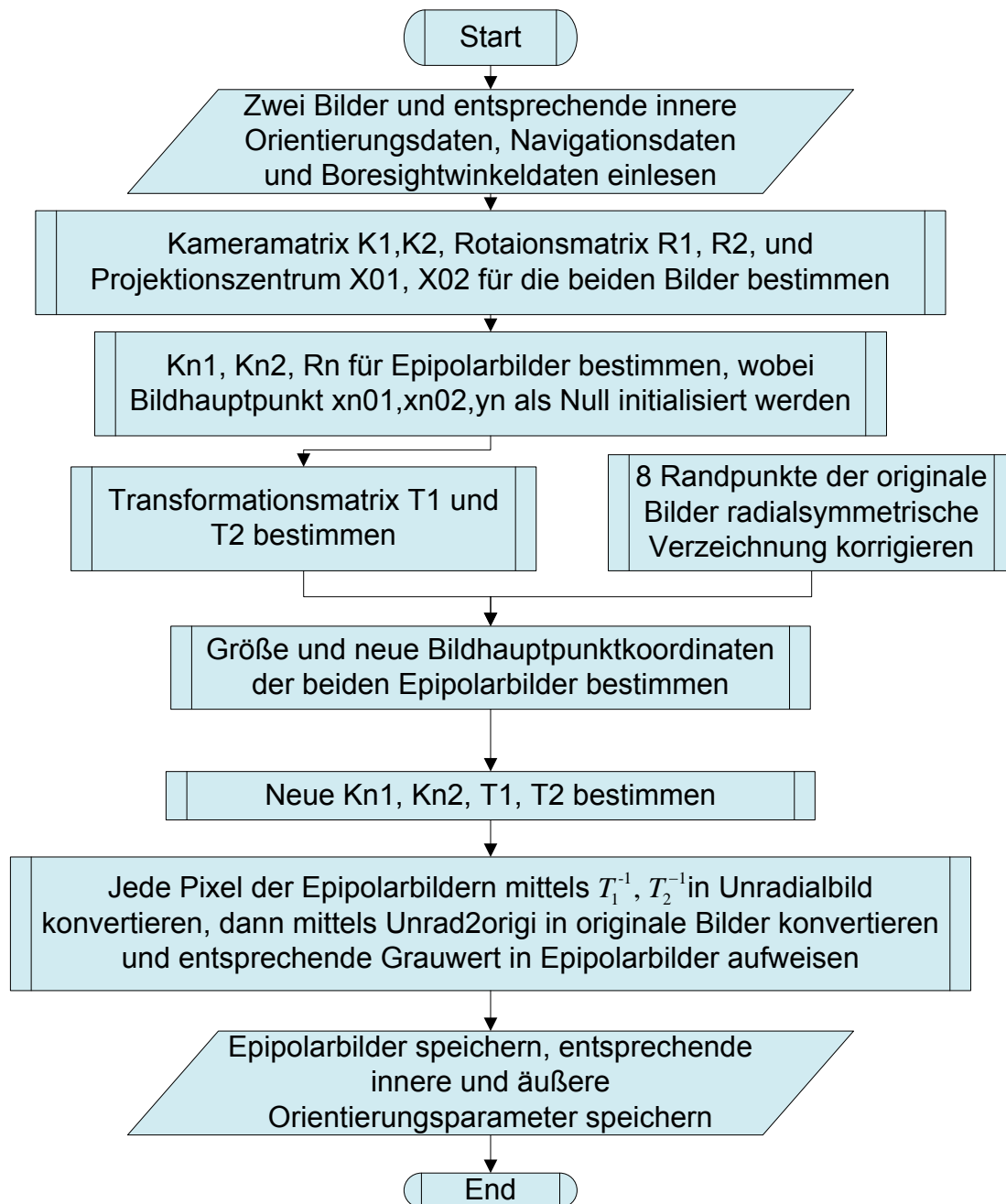


Abbildung 3.8: Flussdiagramm für Generierung von Epipolarbilder

### 3.4 Semi-Global-Matching-Verfahren

#### 3.4.1 Allgemeine Matchingsverfahren für dichte Punktzuordnung

Ein wichtiger Teil der Generierung von DOM ist die dichte Punktzuordnung. Zwei wichtige Gruppen der Verfahren für dichte Punktzuordnung werden vorgestellt.

Fensterbasierte Standardverfahren basieren auf der Zuordnung von kleinen Bildausschnitten (Fenstern). Das Korrelationsverfahren ist ein Verfahren zum pixelgenauen Matching,

während LSM (Least squares Matching) ein subpixelgenaues Matchingverfahren ist. Vorteil von LSM ist, dass es sehr genaue Ergebnisse liefert (bis zu 0.1 Pixel). Bei abrupten Höhenänderungen (z.B. an Häuserkanten) haben alle fensterbasierten Verfahren Probleme, da die Umgebung der Kantenpunkte für verschiedene Blickrichtung unterschiedlich in Suchfenster abgebildet wird. Dies führt dann zu Fehlmatching oder verwaschenen Kanten in Gebieten mit starken Höhengsprüngen wie sie z.B. in der Stadt häufig vorkommen.

Die zweite Gruppe ist die pixelbasierte Punktzuordnung. Die Verfahren betrachten den Grauwert der einzelner Pixel oder nur in sehr kleine Suchfenster. Zusätzlich werden Abhängigkeiten zwischen den Disparitäten der Nachbapixel betrachtet, um Mehrdeutigkeiten auszuschließen.

Drei bekannte Verfahren dieser Gruppe sind: Dynamic line warping (DLW), GraphCut und Semi Global Matching (SGM). DLW beschränkt die Nachbarschaft auf alle Pixel in einer Epipolarzeile, Nachbarschaftbedingungen zwischen den Epipolarlinien können nicht verwendet werden. Dabei können insbesondere in homogenen Bildbereichen inkonsistente Lösungen gefunden werden. Das GraphCut Verfahren löst dieses Problem, indem alle Disparitäten im ganzen Bild in einem Optimierungsschritt betrachtet werden. Die Laufzeit ist dann relativ lang. Das Semi-global-Matching-Verfahren betrachtet auch alle Disparität der Nachbarschaft über ganzes Bild und benutzt um den Korrelationspunkt herum eindimensionale Kostenpfade aus mehreren Richtungen. Es liefert eine relative gute Lösung und ist ein guter Kompromiss zwischen Laufzeit und Qualität. Deswegen wird in diese Diplomarbeit das Verfahren Semi-Global-Matching gewählt, um DOM für Stadtgebiet zu generieren.

### 3.4.2 Kurze Vorstellung von Semi-Global-Matching

Ich habe die in Xdibias bestehende Implementierung für SGM verwendet. Deswegen wird hier nur eine kurze Vorstellung von SGM erläutert. SGM wird in [13] ausführlich beschrieben.

Zwei wichtige Elemente von SGM sind die Kostenfunktion und die Nachbarschaftsbedingungen. Als Kostenfunktion wird typischerweise SAD (Summe der absoluten Differenzen der Grauwerte) oder Mutual-Information (MI) verwendet. SAD betrachtet nur die Grauwertunterschiede sind deswegen einfach zu implementieren, funktioniert aber nur für Bildpaar mit ähnlichen Aufnahmebedingungen. MI gibt für jede Grauwertkombination eine Wahrscheinlichkeit wieder, wie gut diese Grauwerte in den beiden Bildern miteinander korrelieren.

Durch Verwendung der Kostenpfade aus 16 Richtungen bezieht SGM die Umgebung um den Korrelationspunkt herum mit ein und man erhält dadurch weichere Höhenübergänge.

Eine globale Energiefunktion wird wie folgt definiert:

$$E(D) = \sum_p C_M(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \quad (3.25)$$

Der erste Term der Summe bezieht sich auf den Matchingkosten für jeden Punkt  $p$  des Höhenmodells  $D$ . Der zweite Term betrachtet alle Nachbapixel, deren Disparitätsunterschied eins beträgt. Der dritte Term wird für größere Disparitätsänderungen hinzugefügt.  $P_1$  und  $P_2$  sind Konstante und werden vom Anwender vorgegeben. Ihre Größe hängt von der Kostenfunktion und vom Bildmaterial ab. Alle Ergebnisse in dieser Diplomarbeit wurden mit  $P_1=100$  und  $P_2=900$  berechnet.

Durch die Approximation der globalen Betrachtung ist die Laufzeit des SGMs proportional zu Breite  $\times$  Höhe  $\times$  Disparitätssuchbereich. Das ist ein großer Vorteil von SGM im Vergleich zu anderen Verfahren.

SGM benötigt Speicher für die Kosten aller potentiellen Zuordnungen, um große Bilder verarbeiten zu können wird die Berechnung in Bildausschnitten durchgeführt und zum Schluss zusammengeführt.

### 3.4.3 Bestimmung der minimalen und maximalen Disparität

Um die Suchbereich des Semi-Global-Matching zu begrenzen, sollte die minimale und maximale Disparität aus der äußere Orientierung der Epipolarbilder bestimmt werden.

Aus der Kollinearitätsgleichung (siehe [12] Seite 14) gilt:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y - y_0 &= -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Wobei R die Rotationsmatrix von Bildkoordinatensystem zu Objektkoordinatensystem ist.

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = R_3(\kappa)R_2(\varphi)R_1(\omega) \quad (3.27)$$

$(x_1, y_1)$  und  $(x_2, y_2)$  sind zum Objektpunkt  $(X, Y, Z)$  gehörenden Bildkoordinaten in den Epipolarbildern. Aus den Eigenschaften der Epipolarbilder folgt  $y_1$  gleich  $y_2$ . Die Disparität hängt nur von den x-Koordinaten ab. Für die beiden x-Koordinaten gilt:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{01} - c \frac{r_{11}(X - X_{01}) + r_{21}(Y - Y_{01}) + r_{31}(Z - Z_{01})}{r_{13}(X - X_{01}) + r_{23}(Y - Y_{01}) + r_{33}(Z - Z_{01})} \\ x_2 &= x_{02} - c \frac{r_{11}(X - X_{02}) + r_{21}(Y - Y_{02}) + r_{31}(Z - Z_{02})}{r_{13}(X - X_{02}) + r_{23}(Y - Y_{02}) + r_{33}(Z - Z_{02})} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Weil die Disparität in Pixel Koordinatensystem definiert ist, sollte man noch die Bildkoordinaten in Pixelkoordinatensystem transformieren. Genauere Definition ist in Anhang A Abbildung dargestellt.

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{\text{Anzahl\_rows}_1 - 1}{2} - \frac{x_1}{P_s} \\ d_2 &= \frac{\text{Anzahl\_rows}_2 - 1}{2} - \frac{x_2}{P_s} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Die Disparität ist dann:

$$d = d_1 - d_2 = \frac{\text{Anzahl\_rows}_1 - \text{Anzahl\_rows}_2}{2} - \frac{x_1 - x_2}{P_s} \quad (3.30)$$

Wobei  $P_s$  Pixelgröße darstellt.

Für die Annahme, dass die Bilder nach Nadirrichtung aufgenommen werden, die Flughöhe nicht so groß geändert ist und die Format der beiden Bilder gleich sind, vereinfacht sich die Formel zu:

$$d = \frac{c}{P_s} \frac{X_{02} - X_{01}}{Z - Z_{01}} \quad (3.31)$$

Mit der Annahme:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad Z_{01} = Z_{02}, x_{01} = x_{02} \quad (3.32)$$

$$\text{Anzahl\_rows}_1 = \text{Anzahl\_rows}_2$$

Kann die Disparität mit Formel (3.31) grob berechnet werden. Die Disparität hängt dann nur von den Z-Koordinaten der Objektpunkte ab.

In diese Diplomarbeit werden Formel (3.28) und (3.30) verwendet. Der Objektpunkt ist so definiert:

$$X = \frac{X_{01} + X_{02}}{2}, \quad Y = \frac{Y_{01} + Y_{02}}{2}, \quad Z_{mean} = Z_{01} - Fh \quad (3.33)$$

Der Objektpunkt liegt zwischen den beiden Projektionszentren. Die Flughöhe ( $Fh$ ) ist normalerweise bekannt.  $Z_{mean}$  ist die mittlere Höhe in der Testgebiet. Für die Berechnung der maximalen und minimalen Disparität sollte noch eine Abweichung der Geländehöhe ( $Z_{abw}$ ) um  $Z_{mean}$  definiert werden. Die maximale und minimale Disparität ist dann:

$$\begin{aligned} disp_{max} &= d(X, Y, Z) = d\left(\frac{X_{01} + X_{02}}{2}, \frac{Y_{01} + Y_{02}}{2}, Z_{01} - Fh - Z_{abw}\right) \\ disp_{min} &= d(X, Y, Z) = d\left(\frac{X_{01} + X_{02}}{2}, \frac{Y_{01} + Y_{02}}{2}, Z_{01} - Fh + Z_{abw}\right) \end{aligned} \quad (3.34)$$

### 3.5 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Unter räumliche Vorwärtsschnitt versteht man die Aufgabe bei gegebener innerer und äußerer Orientierung die Objektkoordinaten eines Punktes mit Hilfe der in korrespondierenden Bildern gemessenen vier Bildkoordinaten zu berechnen[12].

Die projektiven Beziehungen zwischen der Bildebene und der Objektebene werden durch folgende Gleichung beschrieben ([12], Seite 15):

$$\begin{aligned} X - X_0 &= (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(-c)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(-c)} \\ Y - Y_0 &= (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(-c)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(-c)} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Wobei  $R$  ist die Rotationsmatrix von Bildkoordinatensystem in das Objektkoordinatensystem ist.  $R$  kann man aus den Rotationswinkeln wie folgt bestimmen:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = R_3(\kappa)R_2(\varphi)R_1(\omega) \quad (3.36)$$

Weil die Rotationsmatrix  $R$ , Kamerakonstante  $c$  und Hauptpunktlage  $y_0$  für beide Epipolarbilder gleich sind, gilt:

$$\begin{aligned} X - X_{01} &= (Z - Z_{01}) \frac{r_{11}(x - x_{01}) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(-c)}{r_{31}(x - x_{01}) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(-c)} = (Z - Z_{01})k_{x1} \\ Y - Y_{01} &= (Z - Z_{01}) \frac{r_{21}(x - x_{01}) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(-c)}{r_{31}(x - x_{01}) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(-c)} = (Z - Z_{01})k_{y1} \\ X - X_{02} &= (Z - Z_{02}) \frac{r_{11}(x - d(x) - x_{02}) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(-c)}{r_{31}(x - d(x) - x_{02}) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(-c)} = (Z - Z_{02})k_{x2} \\ Y - Y_{02} &= (Z - Z_{02}) \frac{r_{21}(x - d(x) - x_{02}) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(-c)}{r_{31}(x - d(x) - x_{02}) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(-c)} = (Z - Z_{02})k_{y2} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Wobei  $d(x) = x_1 - x_2$  die Disparität eines Punktes ist. Die Disparität kann direkt aus Disparitätsbild eingelesen werden. Für jedes Bildpaar gibt es folgende Konstante:

$$\begin{aligned} kx1o &= -r_{11}x_{01} - r_{12}y_0 - r_{13}c \\ kx1u &= -r_{31}x_{01} - r_{32}y_0 - r_{33}c \\ kx2o &= -r_{11}x_{02} - r_{12}y_0 - r_{13}c \\ kx2u &= -r_{31}x_{02} - r_{32}y_0 - r_{33}c \\ ky1o &= -r_{21}x_{01} - r_{22}y_0 - r_{23}c \\ ky2o &= -r_{21}x_{02} - r_{22}y_0 - r_{23}c \end{aligned} \quad (3.38)$$

Die Parameter  $k_{x1}, k_{x2}, k_{y1}, k_{y2}$  werden dann wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned}
k_{x1} &= \frac{r_{11}x + r_{12}y + kx1o}{r_{31}x + r_{32}y + kx1u} \\
k_{y1} &= \frac{r_{21}x + r_{22}y + ky1o}{r_{31}x + r_{32}y + kx1u} \\
k_{x2} &= \frac{r_{11}(x - d(x)) + r_{12}y + kx2o}{r_{31}(x - d(x)) + r_{32}y + kx2u} \\
k_{y2} &= \frac{r_{21}(x - d(x)) + r_{22}y + ky2o}{r_{31}(x - d(x)) + r_{32}y + kx2u}
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Aus Zeile 1 und Zeile 3 der Formel (3.37) folgt:

$$Z = \frac{X_{02} - Z_{02}k_{x2} + Z_{01}k_{x1} - X_{01}}{k_{x1} - k_{x2}} \tag{3.40}$$

Dies wird in vorheriger Formel (3.37) eingesetzt:

$$\begin{aligned}
X &= X_{01} + (Z - Z_{01})k_{x1} \\
Y &= Y_{01} + (Z - Z_{01})k_{y1} \\
\text{Als Kontrolle: } Y &= Y_{02} + (Z - Z_{02})k_{y2}
\end{aligned} \tag{3.41}$$

Mit Formel (3.38), (3.39), (3.40) und (3.41) werden für alle Pixel innerhalb einem Bild 3D Objektkoordinaten bestimmt. Diese Koordinaten werden in eine Datei gespeichert und für weitere Bearbeitung bereitgestellt.

### 3.6 Fusionierung, Interpolation und Darstellung von DOM

Die aus räumlicher Vorwärtsschnitt generierte Punktdaten kann man direkt einlesen und darstellen. Ein digitales Oberflächenmodell kann auf Dreiecksbasis oder Gitterbasis dargestellt werden. In dieser Diplomarbeit wurde ein DOM auf Gitterbasis als finales Ergebnis gewählt. Analog zu den Bildern ist das DOM durch ein regelmäßiges Raster dargestellt. Die Lage sowie die Rasterweite sollten vorher definiert werden. Alle 3D Punkte werden anhand ihrer x- und y-Koordinaten in den Rastern verteilt. Die Fusionierung wird dann innerhalb einzelnen Rasters durchgeführt. Das XDibias-Module „rasterobko“ realisiert die Fusionierung mit fünf Modi: Minimum, Maximum, Mittelwert, gewichtete Mittelwert und Werte mit bester Genauigkeit. In den ersten zwei Modi wird der minimale oder maximale Höhenwert gesucht. Dies funktioniert beim DOM mit vielen Ausreißern nicht so gut. Für die letzten zwei Modi ist die Genauigkeit der Punkte notwendig. Die Genauigkeit kann mit der Basislänge der Bildpaare nach Formel (4.5) abgeleitet werden. Alle der fünf Modi werden in dieser Diplomarbeit getestet. Die Ergebnisse aus den Mittelwert und den gewichtete Mittelwert sind am besten. Für die Fusionierung der Punktfile aus Bildpaare mit gleicher Basislänge ist der Modus „gewichtete Mittelwert“ nicht mehr sinnvoll, da alle Gewichte gleich sind.

Verdeckungen und Fehlmatching führen zu Lücken im fusionierten DOM. Ein Interpolationsverfahren ist dann notwendig, um die Lücken zu erfüllen. In dieser Diplomarbeit

wird das Verfahren „idw“ (inverse distance weight) verwendet. Der Höhenwert einer unbesetzten Rasterzelle wird mit folgender Formel bestimmt:

$$Z_j = \frac{\sum_i \frac{Z_i}{d_i^2}}{\sum_i \frac{1}{d_i^2}} \quad (3.42)$$

Hierbei ist  $Z_i$  der Höhenwert des benachbarten Rasters  $P_i$ ,  $d_i$  ist der euklidische Abstand des Punkts  $P_i$  zum gefüllten Punkt  $P_j$ .

## 4 DOM Generierung und Auswertung auf dem Datensatz „München Zentrum“

Die in dieser Diplomarbeit entwickelten Programme wurden zuerst für den Datensatz „München Zentrum“ geschrieben, danach wurden die Programme verallgemeinert.

In diesem Kapitel wird zuerst die Befliegung im Zentrum von München vorgestellt. Danach werden die theoretisch erreichbare absolute Genauigkeit und die Vollständigkeit des DOMs untersucht. Weiterhin wird auf die Ergebnisse aus den stark überlappenden Bildsequenzen eingegangen. Zum Schluss kommen eine Bewertung und eine Analyse.

### 4.1 Befliegung

Am 11. August 2008 hat ein Forschungsflugzeug (siehe Abbildung 4.1) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) die Innenstadt Münchens überflogen und hoch aufgelöste Luftbilder mit dem 3K Kamera System erstellt.

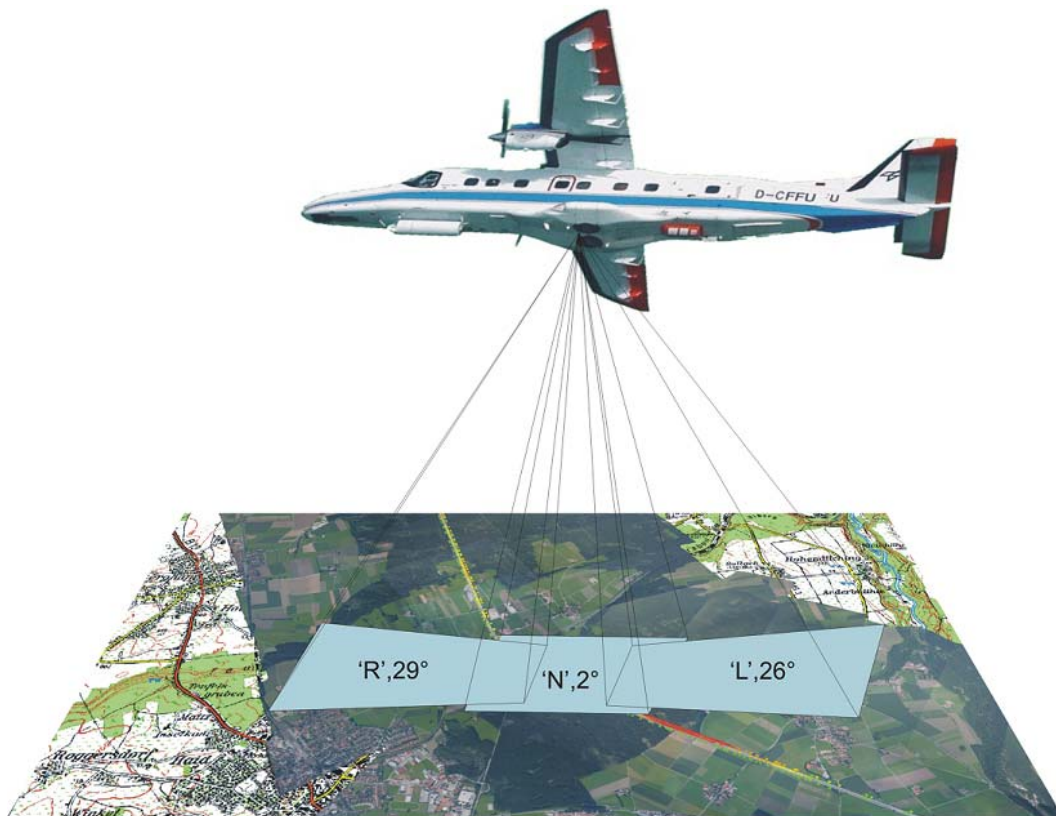


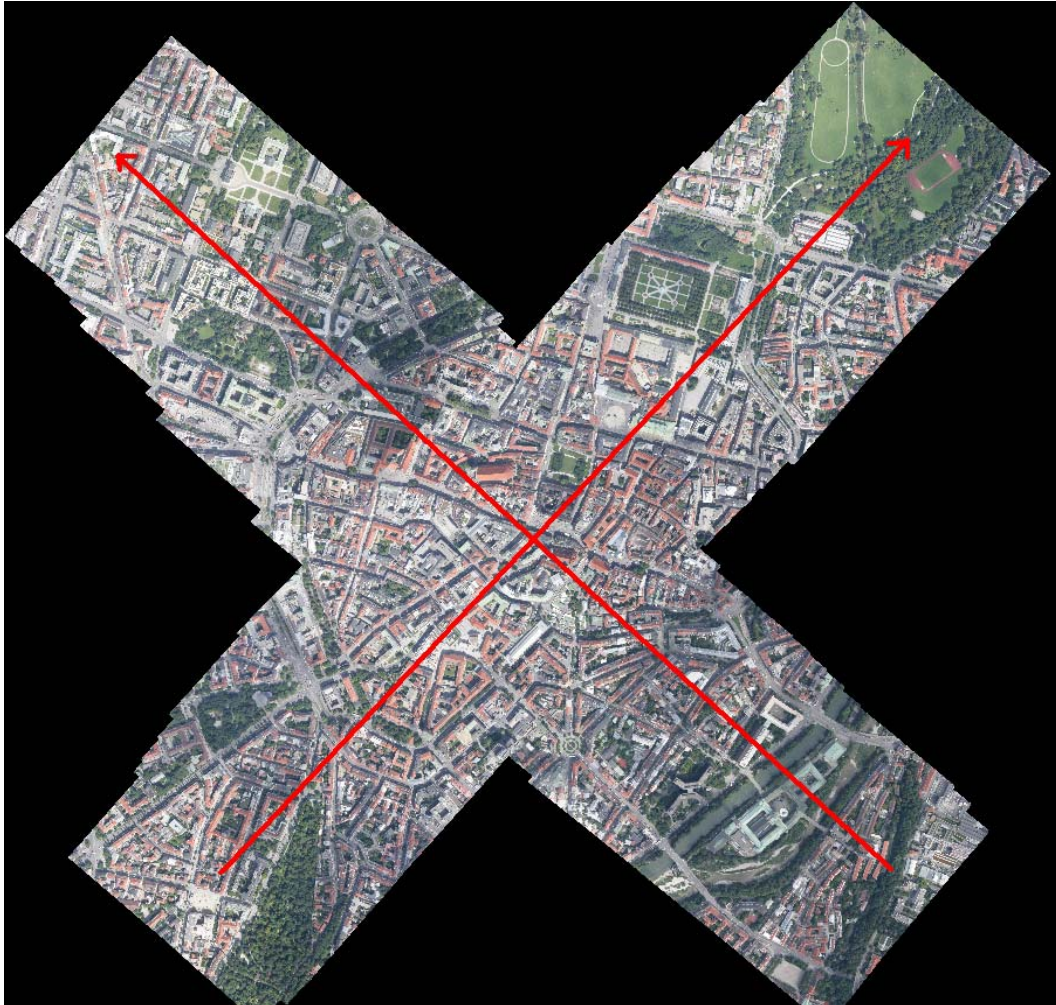
Abbildung 4.1: Beflug in der innere Stadt München

Folgendes sind die Flugdaten

- Flughöhe über Boden: ca. 1500m
- Fluggeschwindigkeit: 70 m/s
- Zeitabstand zwischen den Aufnahmen: 0.5 s
- Basislänge zw. Nachbarbildern: 35m



- Überlappung der Nadirbilder in Flugrichtung: 96%
- Bodenauflösung: 25cm
- Befliegung: 2 Streifen senkrecht zu einander (siehe Abbildung 4.2)
- Aufnahmemodus: Rück-, Nadir-, und Vorblick Kamera (siehe Abbildung 4.1)



**Abbildung 4.2: Orthophoto des Beflugs in der innere Stadt München**

Da die Aufnahmefrequenz (2 Hz) größer als die kontinuierliche Aufnahmefrequenz 0.5 Hz ist, hat das Flugzeug nach ca. 30 Aufnahmen den Flugstreifen abgebrochen, um die Daten von einem Kamera internen Zwischenspeicher zu einer SD-Speicherkarte zu verschieben und ist dann wieder an der Stelle zurück auf den Flugstreifen geflogen.

Für die direkte Georeferenzierung wurde ein DGPS-Messverfahren mit Korrektursignal verwendet. Die Messergebnisse aus GPS und IMU-System werden mit Kalmanfilter zusammengeführt. Weil die äußeren Orientierungsparameter für jedes Bild ohne Passpunktinformation nur aus den GPS- und IMU-Messungen abgeleitet werden, hängt die absolute Genauigkeit des DOMs stark von der Messgenauigkeit des GPS-IMU-Systems ab. Die lange Pause am abgebrochenen Flugstreifen zwischen zwei Bildaufnahmen verschlechtert die relative Genauigkeit der IMU-Messungen. Dies führt dazu, dass an dieser Sprungsstelle in der gleichen Spalte der generierte Epipolarbildpaar nicht mehr die entsprechenden Epipolarlinien sind und das DOM nicht generiert werden kann. Deswegen

werden nur die Bildpaare, die jeweils vor oder nach dem Abbruch aufgenommen sind, für die DOM-Generierung verwendet.

## 4.2 Theoretische Betrachtung

Ein Ziel der Untersuchung des Datensatzes „München Zentrum“ ist, die Genauigkeit und Vollständigkeit des generierten DOM zu analysieren und eine Empfehlung für zukünftige Flugplanungen (besonders die Aufnahmezeit bzw. die Basislänge zw. Nachbarbildern) des 3K-Kerasystems zu geben. In diesem Abschnitt wird die Abhängigkeit von Genauigkeit und Vollständigkeit des DOMs von der Basislänge theoretisch untersucht.

### 4.2.1 Genauigkeitsuntersuchung

Die Genauigkeit der Objektpunktkoordinaten kann man aus Formel (3.41, 3.42) im Abschnitt „Räumlicher Vorwärtsschnitt“ ableiten. Anhand der Formeln ist zu erkennen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse von der inneren und äußeren Orientierung sowie der Disparität abhängen. Weiterhin beeinflussen die Genauigkeit der Kalibrierung der 3K-Kerasystem, die Genauigkeit der GPS und IMU Messungen und die Genauigkeit des Semiglobal-Matching die Genauigkeit der Ergebnisse.

Für eine direkte DOM-Generierung ist der Einfluss der IMU-Messungen und des Semi-global-Matchings am größten.

#### 4.2.1.1 Einfluss der IMU-Messung

Für die Bestimmung des Einflusses der IMU-Messung sollte normalerweise eine „Bündelblockausgleichung“ durchgeführt werden. Hier wird der Einfluss der IMU-Messung auf die Lagegenauigkeit nur grob geschätzt. Die Funktion zwischen IMU-Messungen Roll, Pitch, Yaw und den 3D-Koordinaten wird vereinfacht so formuliert:

$$y(X, Y, Z) = F(roll, pitch, yaw) \quad (4.1)$$

Aus Fehlerfortpflanzungstheorie folgt für die Genauigkeiten der Objektkoordinaten:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 \\ \sigma_y^2 \\ \sigma_z^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial roll} & \frac{\partial X}{\partial pitch} & \frac{\partial X}{\partial yaw} \\ \frac{\partial Y}{\partial roll} & \frac{\partial Y}{\partial pitch} & \frac{\partial Y}{\partial yaw} \\ \frac{\partial Z}{\partial roll} & \frac{\partial Z}{\partial pitch} & \frac{\partial Z}{\partial yaw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{roll}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{pitch}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{yaw}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial roll} & \frac{\partial X}{\partial pitch} & \frac{\partial X}{\partial yaw} \\ \frac{\partial Y}{\partial roll} & \frac{\partial Y}{\partial pitch} & \frac{\partial Y}{\partial yaw} \\ \frac{\partial Z}{\partial roll} & \frac{\partial Z}{\partial pitch} & \frac{\partial Z}{\partial yaw} \end{bmatrix}^T \quad (4.2)$$

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial X}{\partial roll}\right)^2 \sigma_{roll}^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial pitch}\right)^2 \sigma_{pitch}^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial yaw}\right)^2 \sigma_{yaw}^2$$

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial Y}{\partial roll}\right)^2 \sigma_{roll}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial pitch}\right)^2 \sigma_{pitch}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial yaw}\right)^2 \sigma_{yaw}^2$$

$$\sigma_z^2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial roll}\right)^2 \sigma_{roll}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial pitch}\right)^2 \sigma_{pitch}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial yaw}\right)^2 \sigma_{yaw}^2$$

Anhand der Formel (4.2) können aus gegebener Genauigkeit der IMU-Messung die Genauigkeiten der Objektkoordinaten abgeleitet werden.

Die Genauigkeiten von IMU-Messungen sind anhand der Herstellerangaben für das IGI IIb gegeben:  $\sigma_{roll} = \sigma_{pitch} = 0.01^\circ$ ,  $\sigma_{yaw} = 0.1^\circ$ . Die partiellen Ableitungen könnten anhand der Formeln im Abschnitt 3.5 abgeleitet werden. In dieser Diplomarbeit wird einfach die numerische Ableitung verwendet.

Für die Berechnung der partiellen Ableitungen werden zehn berechnete Punkte aus dem Bildpaar N0388 N0389 verwendet. Die berechneten partiellen Ableitungen werden dann gemittelt und man kann folgendes zeigen:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial roll} & \frac{\partial X}{\partial pitch} & \frac{\partial X}{\partial yaw} \\ \frac{\partial Y}{\partial roll} & \frac{\partial Y}{\partial pitch} & \frac{\partial Y}{\partial yaw} \\ \frac{\partial Z}{\partial roll} & \frac{\partial Z}{\partial pitch} & \frac{\partial Z}{\partial yaw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18.72 & -17.48 & -6.15 \\ 17.50 & 18.60 & -7.38 \\ -4.21 & -5.75 & -27.50 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Die Genauigkeiten der den Objektkoordinaten sind dann:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{(0.18)^2 + (-0.17)^2 + (-0.615)^2} = 0.66 \text{ [m]} \\ \sigma_y &= \sqrt{(0.17)^2 + (0.18)^2 + (-0.74)^2} = 0.78 \text{ [m]} \\ \sigma_z &= \sqrt{(-0.04)^2 + (-0.05)^2 + (-2.75)^2} = 2.75 \text{ [m]} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Von der obigen Formel ist zu erkennen, dass der Einfluss des Yaw-Winkels größer als der von der anderen zwei Winkeln ist.

#### 4.2.1.2 Einfluss des Semi-global-matchings

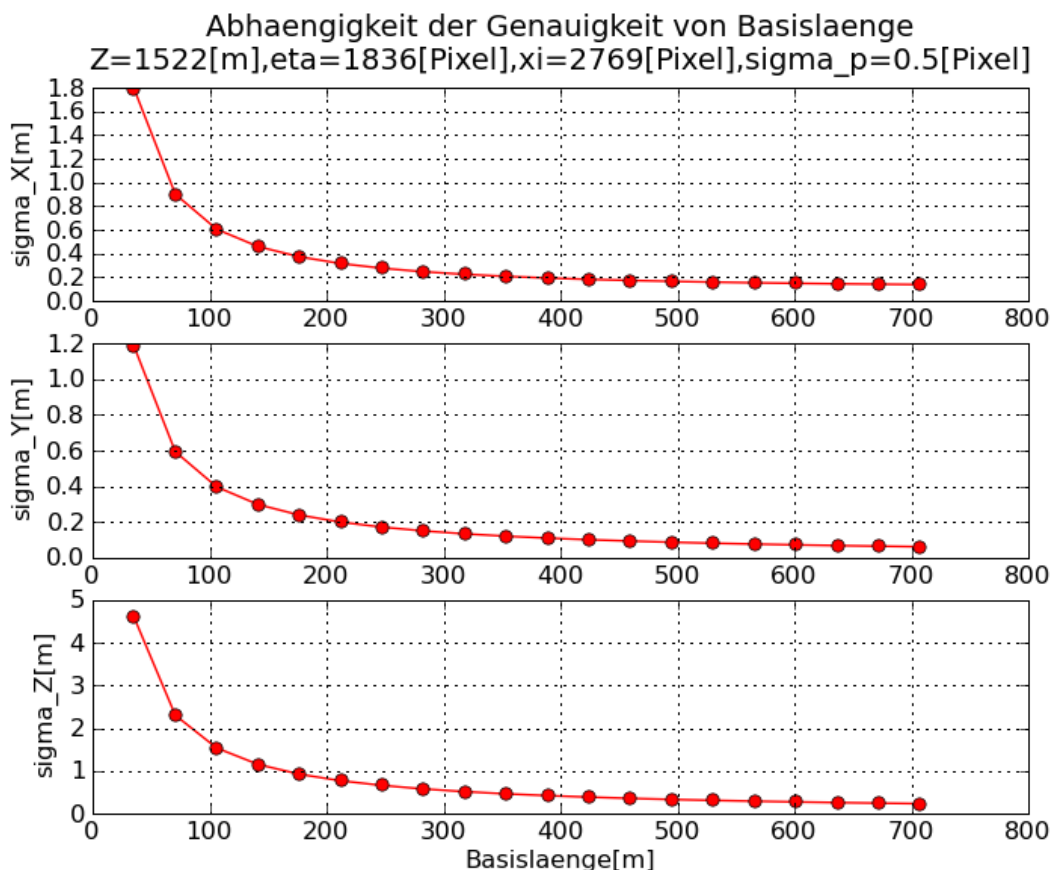
Um den Einfluss des Semi-global-Matchings genauer zu betrachten, wird die Formel (3.38) so vereinfacht, dass die Parameter der inneren sowie der äußeren Orientierungen speziell festgelegt werden:  $R = I_{3 \times 3}$ ,  $Z_{01} = Z_{02}$ ,  $x_{01} = x_{02} = y_0 = 0$ . Diese Aufnahmekonfiguration entspricht dann der Fehlertheorie des Normalfalles in [12]. Die mittleren Fehler der Objektkoordinaten können dann aus [12] folgendermaßen bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= m_b \frac{Z}{B} \sigma_{dis} = \frac{Z^2}{cB} \sigma_{dis} \\ \sigma_x &= \sqrt{\left(\frac{x}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{dis}\right)^2 + (m_b \sigma_x)^2} \\ \sigma_y &= \sqrt{\left(\frac{y}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{dis}\right)^2 + (m_b \sigma_y)^2} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Hierbei sind  $Z$  die Flughöhe,  $B$  die Basislänge,  $c$  die Kamerakonstante,  $\sigma_{dis}$  die Genauigkeit des Matchings,  $x, y$  die Bildkoordinaten,  $\sigma_x, \sigma_y$  die Genauigkeit der Bildkoordinaten.

Da beim Semi-Global-Matching eine Parabel verwendet wird, um die Umgebung der Nachbarschaft eines Pixels zu approximieren, kann SGM subpixelgenaue Punktzuordnungen durchführen. Die Qualität der Bildzuordnung ist textur-abhängig und kann mit Bündelblockausgleichung für ein bestimmtes Testgebiet bestimmt werden. Für die Berechnung hier gehe ich von  $\sigma_{dis}$  0.5 Pixel aus. Da die Bildkoordinaten auch während des Bildmatchings bestimmt werden ( $x_1$  ist die Koordinaten des Pixelmittes im Referenz Bilde,  $x_2 = x_1 - d(x)$ ), werden  $\sigma_x, \sigma_y$  auch mit 0.5 Pixel festgelegt. Bei dem Datensatz „München Zentrum“ wird zur Vereinfachung zusätzlich eine Konstante Flughöhe und die Kamerakonstante festgelegt:  $Z = 1522m$ ,  $c = 0.051m$ . Anhand der Formel (4.5) ist zu erkennen, dass  $\sigma_Z$  schließlich nur von der Basislänge abhängt und  $\sigma_x, \sigma_y$  zusätzlich noch von den Bildkoordinaten abhängen.

Als Zahlenbeispiel wird die Basislänge mit mehrfacher Basiseinheit (hier 35m) in die Formel (4.5) eingesetzt. Nur das linke obere Pixel mit Pixelkoordinaten (0, 0) wird untersucht und das Ergebnis wird in Abbildung 4.5 dargestellt.



**Abbildung 4.3: Genauigkeit der Objektpunktkoordinaten abhängig von der Basislänge**

Anhand dieser Abbildung lässt sich wie erwartet folgendes ablesen: Je größer die Basislänge ist, desto besser sind die Genauigkeiten der 3D-Koordinaten. Benachbarte Bildpaare liefern ganz schlechte Ergebnisse.

Weiterhin wird als Basislänge 176.9m (5 Basiseinheiten) angenommen und die Bildkoordinaten -x festgehalten. Der Zusammenhang zwischen der Genauigkeit der Objektpunktkoordinaten und der andere Bildkoordinate y ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Die Abbildung 4.4 zeigt, dass die Pixelposition innerhalb eines Bildes nur die Lagegenauigkeit beeinflusst. Dieser Einfluss ist im Vergleich zur Basislänge relativ gering.

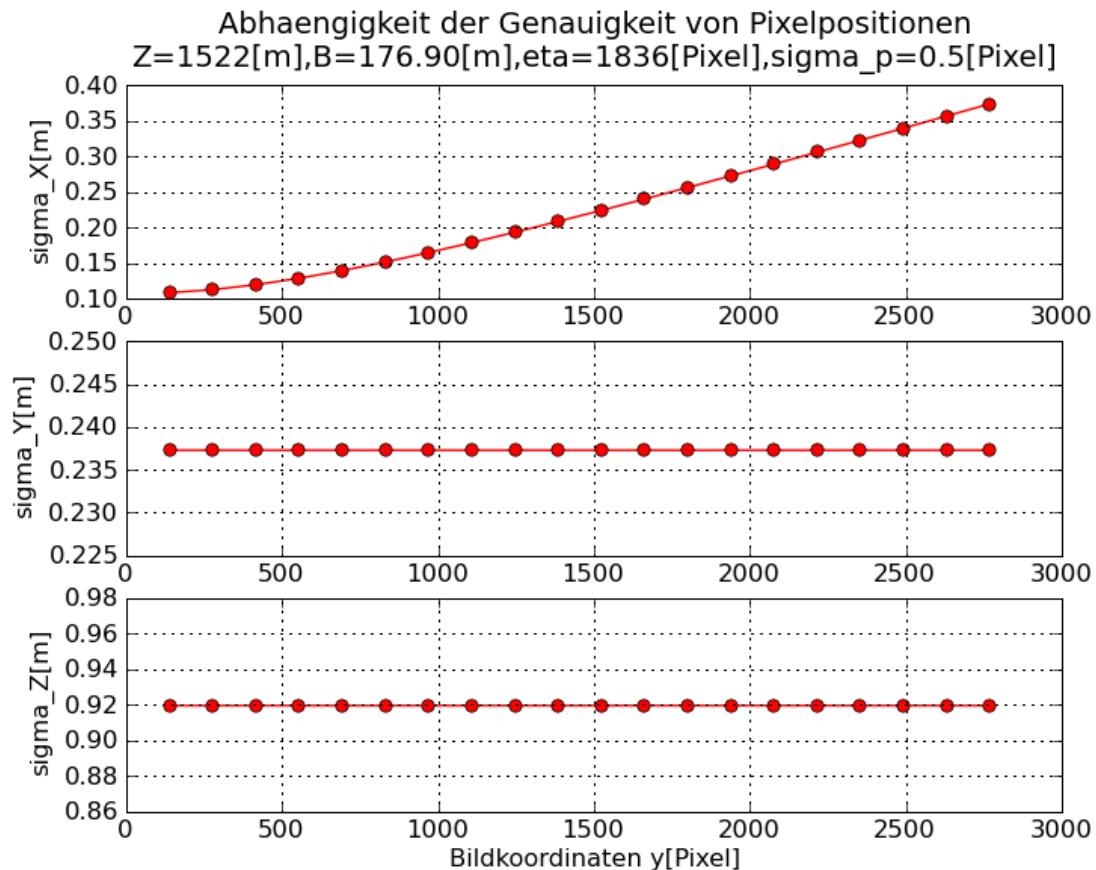


Abbildung 4.4: Genauigkeit der Objektpunktkoordinaten abhängig von Pixelpositionen

## 4.2.2 Untersuchung der Vollständigkeit

Die Vollständigkeit eines digitalen Oberflächenmodells wird hauptsächlich durch zwei Einflussquellen bestimmt: Nicht zuordenbare Bildgebiete (z.B. Bäume, bewegten Menschen oder Fahrzeugen sowie Flächen mit wenig oder widersprüchlicher Bildstruktur) und geometrische Abdeckungen.

Die erste Ursache ist mit vorhandenen Algorithmen schwer zu lösen, die zweite Ursache könnte durch Fusionierung der digitalen Oberflächenmodelle aus verschiedenen Aufnahmepositionen gelöst werden. In diesem Abschnitt wird die Möglichkeit zu Vermeidung von geometrischen Abschattungen im Stadtgebiet genauer untersucht. Dies ist für zukünftige Flugplanungen wichtig. Für eine Echtzeit-Prozessierung ist es wegen der Anforderung von Rechengeschwindigkeit nicht möglich, DOMs aus allen aufgenommenen Bildpaaren zu generieren. Im folgenden wird untersucht, welche Basislänge für eine möglichst vollständige Rekonstruktion aller Gebiete in einem typischen Stadtgebiet notwendig ist. Für die Untersuchung gehen wir davon aus, dass DOM nur aus Nachbarbildern generiert werden und für spätere Fusionierung verwendet werden.

Im DOM für ein Stadtgebiet sind die Strassen oft von hohen Gebäuden abgedeckt. Die Sichtbarkeit einer Straße von mindestens zwei Projektionszentren aus ist die Voraussetzung für die Bestimmung von 3D Objektkoordinaten. In Abbildung 4.5 ist die Geometrie der Aufnahme über einer Straße dargestellt. Die beiden Projektionszentren liegen nicht direkt über der Straße. In der Abbildung sind folgende Elemente gekennzeichnet: B für die Basislänge, o für Straßenbreite, HF für Flughöhe, HG für Gebäudehöhe, a und b für Abstände der Projektionszentren zur Straße und Da und Db für die Abdeckungsbereiche. Es ist leicht folgendes abzuleiten:

$$Da = \frac{a}{HF} HG, \quad Db = \frac{b}{HF} HG \quad (4.6)$$

Der sichtbare Bereich ist dann:

$$Sb = o - Da - Db = o - \frac{a+b}{HF} HG = o - \frac{B-o}{HF} HG = o \cdot \left(1 - \left(\frac{B}{o} - 1\right) \frac{HG}{HF}\right) \quad (4.7)$$

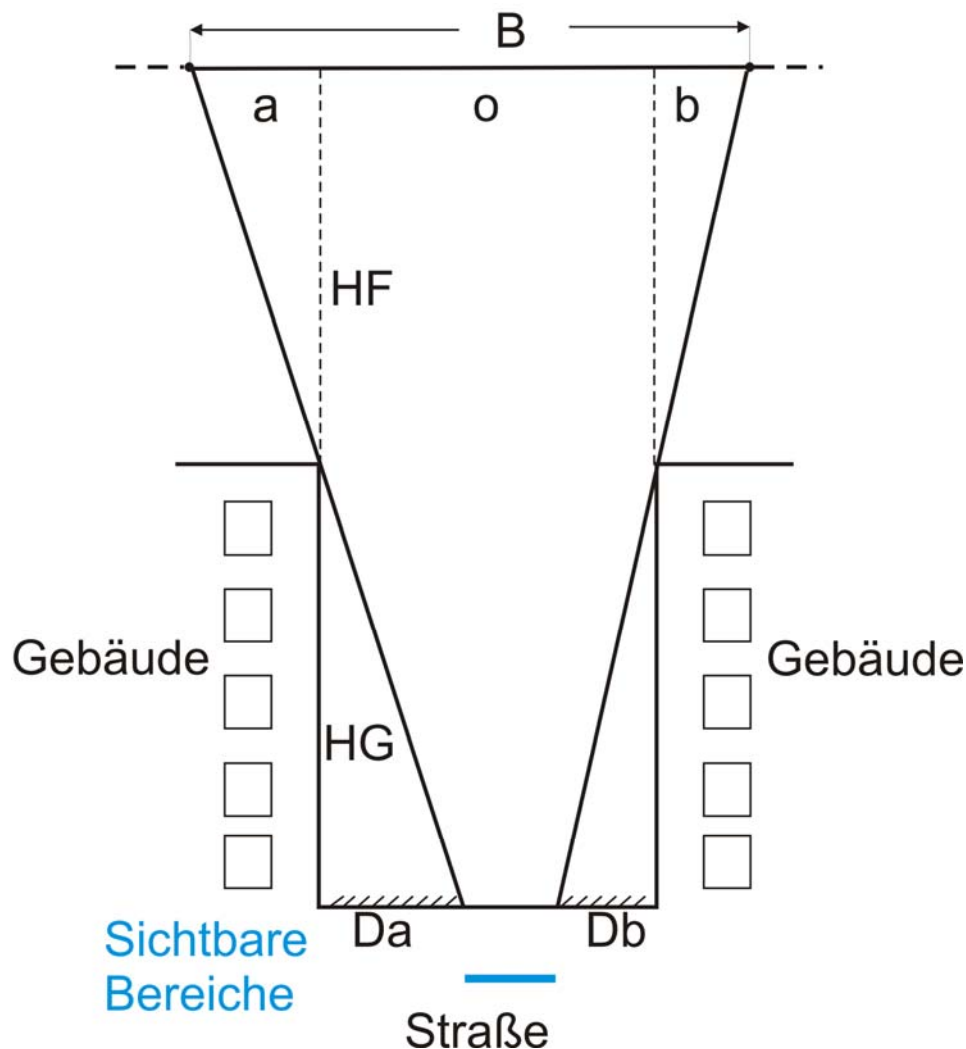
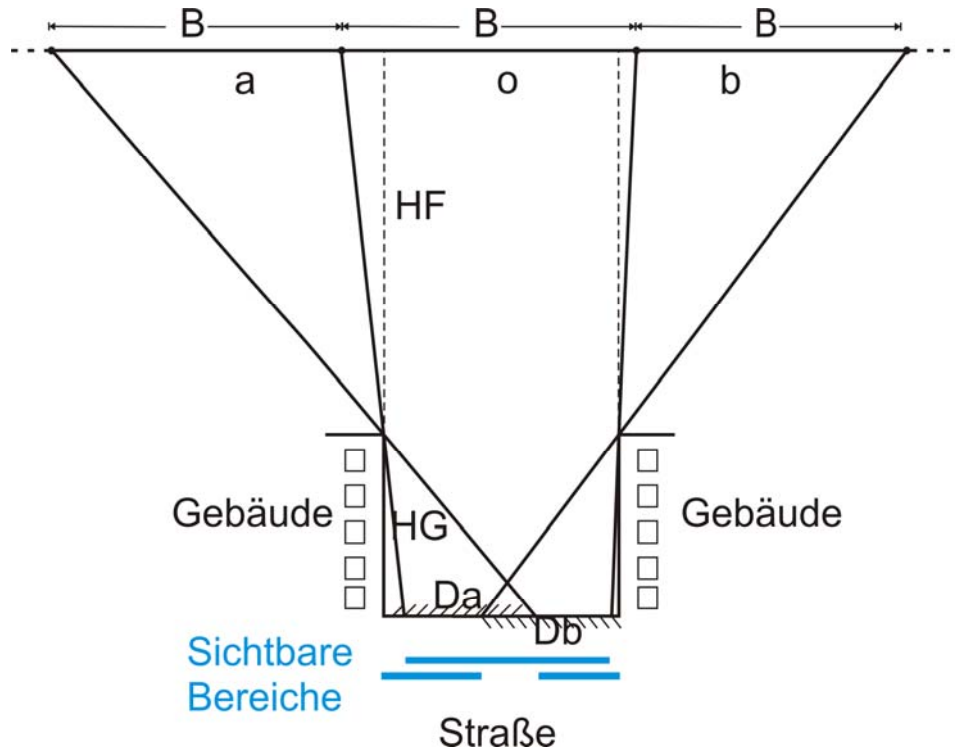


Abbildung 4.5: Geometrie für die Vollständigkeitsuntersuchung ( Beide Projektionszentren liegen nicht direkt über Straße)



Gleichfalls wird der sichtbare Bereich für die zwei weitere Bildpaare in Abbildung 4.6 berechnet:

$$Sb = o - Da + o - Db = 2o - \frac{a+b}{HF} HG = 2o - \frac{3B-o}{HF} HG = o \cdot (2 - (\frac{3B}{o} - 1) \frac{HG}{HF}) \quad (4.8)$$



**Abbildung 4.6: Geometrie für die Vollständigkeitsuntersuchung (weitere Bildpaare)**

Ähnlich wie bei Formel (4.8) sind die sichtbaren Bereiche aller weiteren Bildpaare folgendermaßen zu berechnen:

$$Sb = o \cdot (2 - (\frac{(2n+1)B}{o} - 1) \frac{HG}{HF}), \quad n=1,2,3,\dots \quad (4.9)$$

Die Summe aller sichtbaren Bereiche ist dann:

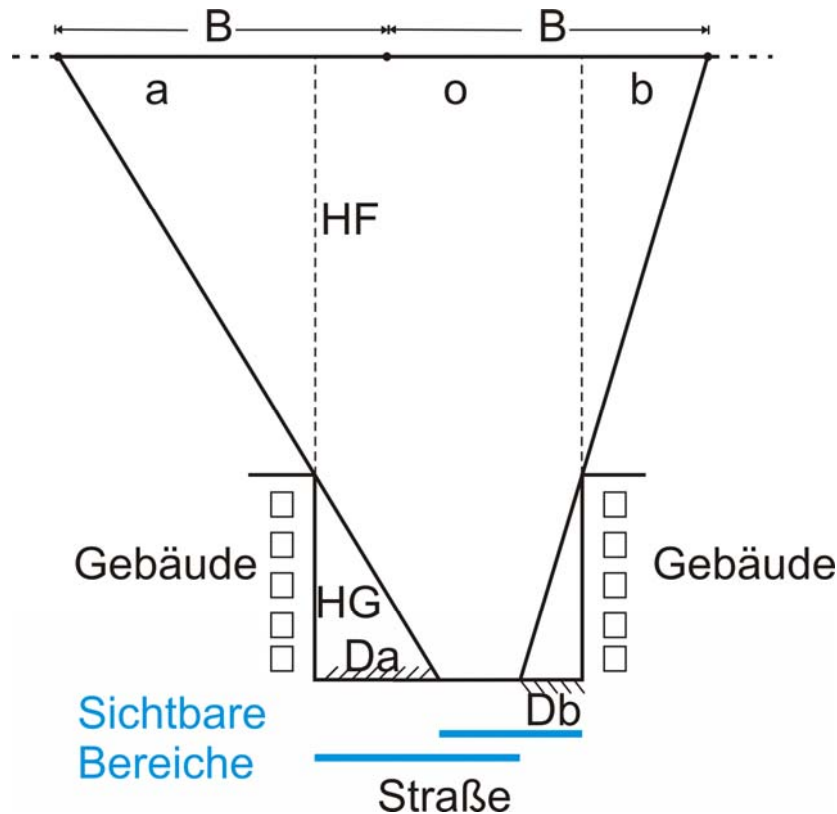
$$Sb_{sum} = o \cdot \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{B}{o} - 1 \right) \frac{HG}{HF} \right] + \sum_{n=1}^{n < \frac{o}{2B} \left( 1 + \frac{2HF}{HG} \right) - \frac{1}{2}} \left[ 2 - \left( \frac{(2n+1)B}{o} - 1 \right) \frac{HG}{HF} \right] \right\} \quad (4.10)$$

Die bisherige Annahme ist, dass die beiden Projektionszentren nicht direkt über der Straße liegen. Falls eine der Projektionszentren direkt über der Straße liegt, verändert sich die abgeleitete Formel. Die Abbildung 4.7 stellt diese Aufnahmegeometrie dar. Ähnlich wie bei Formel (4.8) sind die sichtbaren Bereiche der zwei Bildpaare berechnet:

$$Sb = o \cdot (2 - (\frac{2B}{o} - 1) \frac{HG}{HF}) \quad (4.11)$$

Die Summe aller sichtbaren Bereiche beträgt dann:

$$Sb_{sum} = o \cdot \left\{ \sum_{n=1}^{n < \frac{o}{2B} (1 + \frac{2HF}{HG})} \left[ 2 - \left( \frac{2nB}{o} - 1 \right) \frac{HG}{HF} \right] \right\} \quad (4.12)$$



**Abbildung 4.7: Geometrie für Vollständigkeitsuntersuchung (ein Projektionszentrum liegt direkt über Straße)**

Mit Formeln (4.7), (4.10) und (4.12) kann man die sichtbaren Bereiche in Abhängigkeit von der Basislänge berechnen. In Tabelle 4.1 werden Beispielswerte gezeigt. Dafür werden folgende Werte festgelegt: Basislänge zw. Nachbarbildern  $B=35\text{m}$ , Gebäudehöhe  $HG = 30\text{m}$ , Flughöhe  $HF = 1500\text{m}$ , Straßenbreite  $o=15\text{m}$ . Die Werte der sichtbaren Bereiche in Tabelle werden durch die Straßenbreite normiert. Deswegen ist die Einheit der sichtbare Bereiche [100%].

In folgender Tabelle ist deutlich zu sehen, dass die Ergebnisse aus den beiden Aufnahmefällen ungefähr gleich sind. Die Straße kann theoretisch nur vollständig im DOM dargestellt werden, wenn die Basislänge nicht größer als 350m ist, da ab einer Basislänge von 385m die Summe den sichtbaren Bereich unter 1 beträgt. Für jede Basislänge wird zusätzlich mittels Formel (4.5) die Genauigkeit der Höhe im DOM berechnet. Ab einer Basislänge von 105m wird die Genauigkeit der Höhe geringer als 1.5m. Deswegen ist eine Basislänge zwischen 105m und 350m für die Generierung der DOM in der Stadt am besten. In der Tabelle sind die grün markierte Werte gut und der rot markierte Werte kritisch.



			Keine senkrechte Aufnahmeposition über Straße			Eine senkrechte Aufnahmeposition über Straße	
Basislänge [m]	Anzahl der Basiseinheit	Genauigkeit der Höhe[m]	Sichtbarer Bereich des Bildpaars direkt über der Straße	Anzahl der möglichen Bildpaare	Summe der sichtbaren Bereiche aller möglichen Bildpaare	Anzahl der möglichen Bildpaare	Summe der sichtbaren Bereiche aller möglichen Bildpaare
35	1	4,51	97%	43	2085%	42	2086%
70	2	2,26	93%	21	993%	20	993%
105	3	1,50	88%	13	628%	14	630%
140	4	1,13	83%	9	443%	10	450%
175	5	0,90	79%	7	335%	8	341%
210	6	0,75	74%	7	260%	6	270%
245	7	0,64	69%	5	212%	6	214%
280	8	0,56	65%	5	170%	4	180%
315	9	0,50	60%	3	136%	4	152%
350	10	0,45	55%	3	117%	4	124%
385	11	0,41	51%	3	99%	2	99%
455	13	0,35	41%	3	61%	2	81%
490	14	0,32	37%	3	43%	2	71%
525	15	0,30	32%	1	32%	2	62%
595	17	0,27	23%	1	23%	2	43%
665	19	0,24	13%	1	13%	2	25%
735	21	0,21	4%	1	4%	2	6%

Tabelle 4.1: Zusammenhang zw. Basislänge, sichtbaren Bereich und Genauigkeit des DOMs

Im Stadtzentrum München variiert die Straßenbreite zw. 5m bis 25m. In der Tabelle 4.2 wird der sichtbare Bereich für verschiedene Straßenbreiten berechnet. In der Tabelle ist zu erkennen, dass die sichtbaren Bereiche für enge Straße deutlich geringer als die für breite Straßen sind. Um möglichst viel Straße des Datensatz „München Zentrum“ im DOM darzustellen, sollte die Basislänge zwischen 105m und 175m gewählt werden.

Basislänge [m]	Anzahl der Basiseinheit	Genauigkeit der Höhe[m]	Summe der sicht. Bereiche [100%]			
			Straßenbreite[m]			
			20	15	10	5
35	1	4,51	2814%	2085%	1356%	628%
70	2	2,26	1356%	993%	628%	260%
105	3	1,5	870%	628%	385%	136%
140	4	1,13	628%	443%	260%	80%
175	5	0,9	482%	335%	191%	32%
210	6	0,75	385%	260%	136%	18%
245	7	0,64	316%	212%	108%	4%

Tabelle 4.2: Zusammenhang zw. Basislänge, sichtbaren Bereich, Genauigkeit des DOMs und Straßenbreite (Gebäudehöhe 30m)

### 4.3 Praktische Betrachtung für die Bilder aus DLR 3K-Kamerasystem

#### 4.3.1 Zwischenergebnisse eines Prozess

##### 4.3.1.1 Laufzeit

Im Kapitel 3 werden alle Schritte zur Generierung von DOM dargestellt. In der folgenden Tabelle werden die Laufzeiten jeder Schritte gezeigt. Die grün markierten Schritte sind für Generierung des DOMs notwendig. Diese Laufzeit beträgt 21.3 Minuten. Der höchste Zeitbedarf liegt beim Schritt Semi-Global-Matching. Für die Bewertung des DOMs sind weitere drei Schritte notwendig. Der Zeitbedarf für den Schritt „dem3dshift“ ist sehr hoch. Man kann diesen Schritt dadurch sparen, dass dieser Prozess nicht für das ganze Bild sondern nur einem Ausschnitt des Bildes durchgeführt wird.

Schritte	Programm	Laufzeit ([Sekunde])
Korrektur der radialsymmetrischen Verzeichnung und Generierung von Epipolarbilder	unradial_epipolar	70.1
Bestimmung der minimale und maximale Disparität	minmaxdisp	0.0008
Semi-Global-Matching	sgm	529.2 (8.8 Minuten)
Räumlicher Vorwärtsschnitt	vorwärtsschnitt	42.7
Bestimmung der Translationen zu Referenz DOM	Dem3dshift	1698.9(28.3 Minuten)
Korrektur der Translation	DGMadd	73.6
Fusion und Darstellung der DOMs	rasterobko	15.2
Vergleich des DOMs mit Referenz DOM	DGMvergleich	17.6
Alle Schritte		2463.2 (41.1 Minuten)
Nur die notwendigen Schritte für Generierung des DOMs	(grün markierte)	657.2 (11.0 Minuten)

Tabelle 4.3: Laufzeit jeweiliger Schritte

##### 4.3.1.2 Ergebnisse aus einem Bildpaar der Nadirkamera

In diesem Abschnitt werden beispielhaft die Zwischenergebnisse aus einem Bildpaar der Nadirkamera gezeigt.

Abbildung 4.8 zeigt die ursprünglichen Bilder N0388 und N0391.



Abbildung 4.8: die ursprünglichen Bilder N0388 und N0391

Die Abbildung 4.9 zeigt ein Epipolarbildpaar im IDibias Programm. Die rote Linie stellt zwei korrespondierende Pixel (eine Spitze der Münchener Frauenkirche) des Bildpaares dar. Im Side-by-Side Modus werden die Pixelkoordinaten der beiden Punkte gezeigt. Die zwei Punkte liegen in Spalte 725 und haben eine Disparität von 554 Pixeln. Zu beachten ist, dass die x-Achse bzw. Epipolarlinie in Spalte-Richtung definiert ist, genauer ist das Bildkoordinatensystem in Anhang A beschrieben.

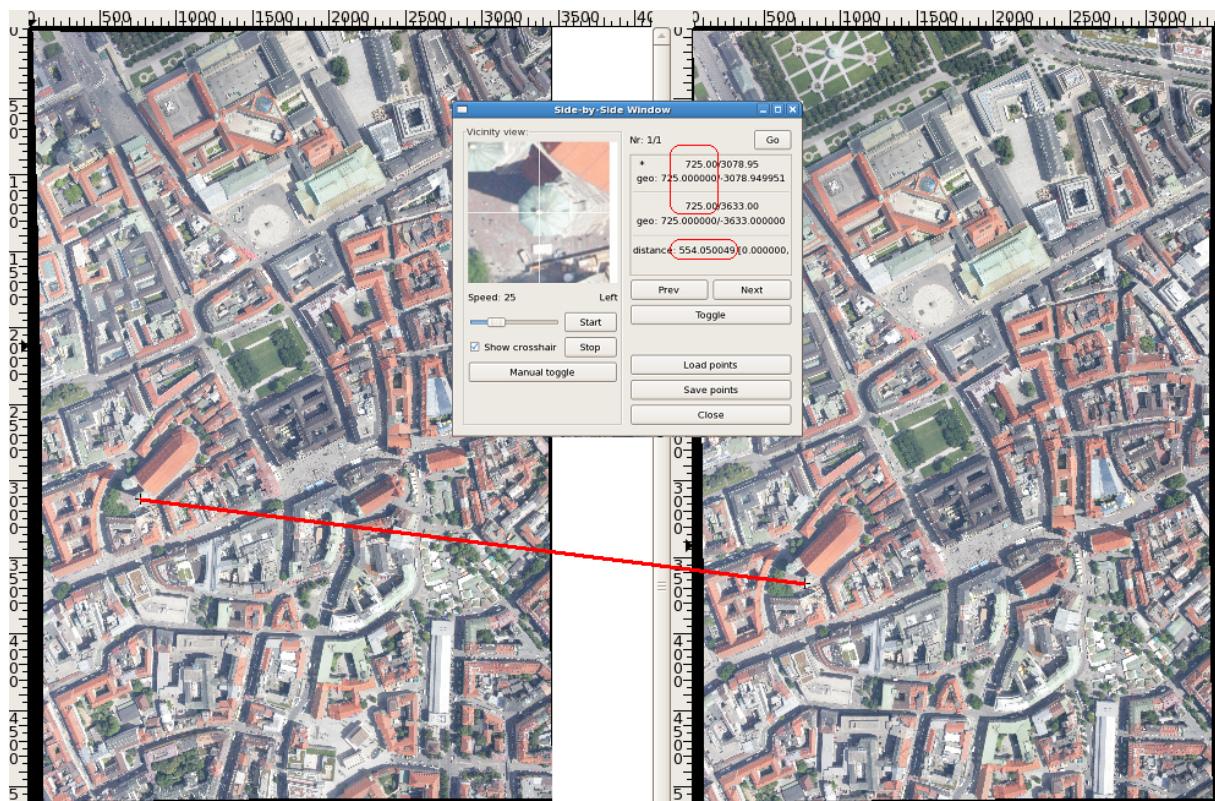


Abbildung 4.9: Die Epipolarbildpaar (mit IDibias software dargestellt)

Das Ergebnis des Semi-Global-Matchings ist ein Disparitätsbild. In Abbildung 4.10 wird das Disparitätsbild mit Farbskala dargestellt. Das Disparitätsbild hat gleiche Größe wie das linke Epipolarbild. Im Bild ist die Spitze der Kirche markiert. Die blaue Farbe weist eine Disparität von ca. -552 auf. Dies stimmt mit der Messung in Abbildung 4.9 überein.



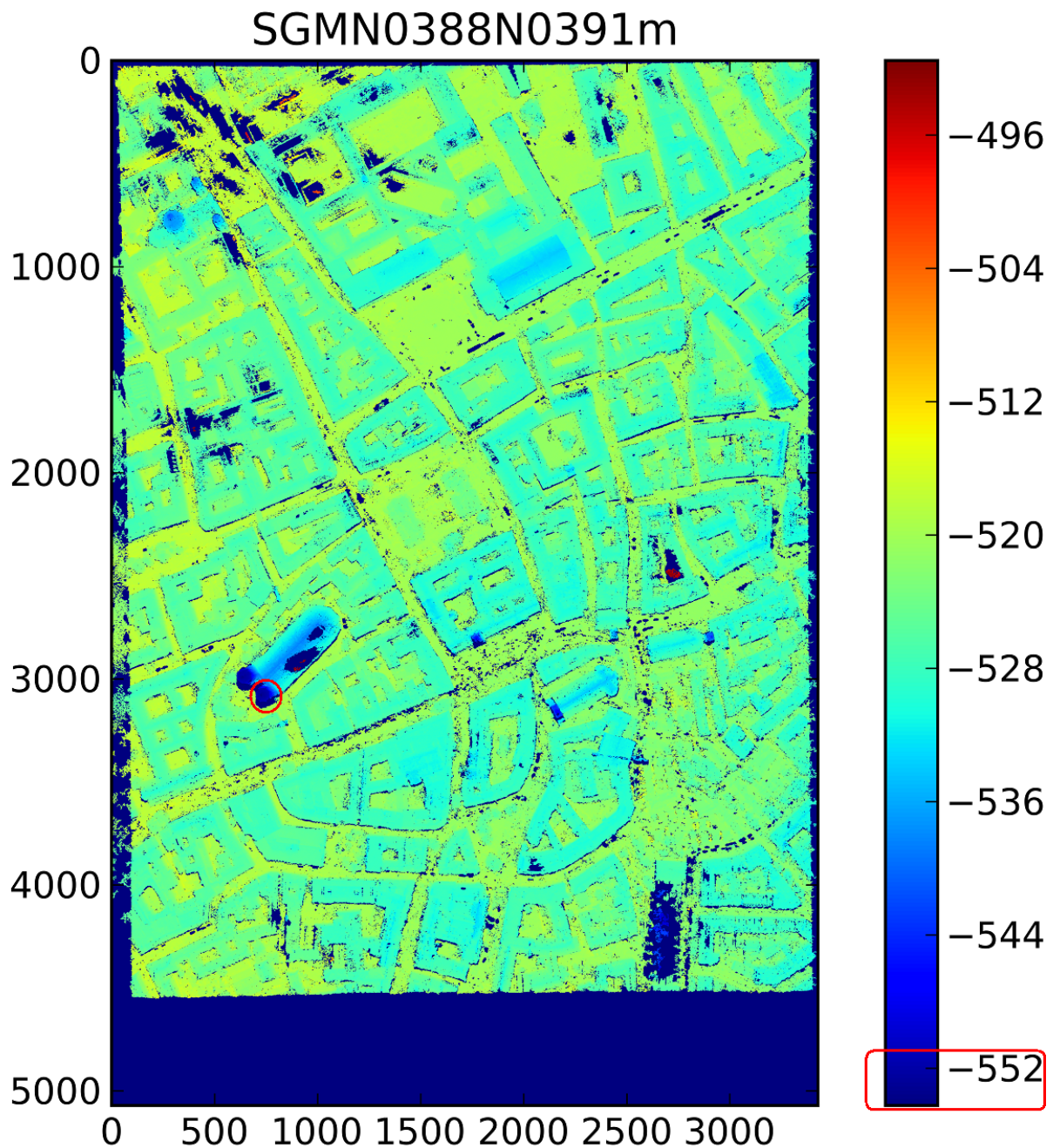


Abbildung 4.10: Disparitätsbild (für Bildpaar N0388, N0391)

In der Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 werden das digitale Oberflächenmodell und das Differenzbild zu einem DOM aus Laserdaten gezeigt. Darin kann man die Spitze der Frauenkirche deutlich sehen. Die Normalhöhe der Spitze beträgt ca. 615 Meter. Im Differenzbild ist klar zu erkennen, dass die meisten hohen Differenzen an Gebäudekanten sowie in Bäumen liegen.

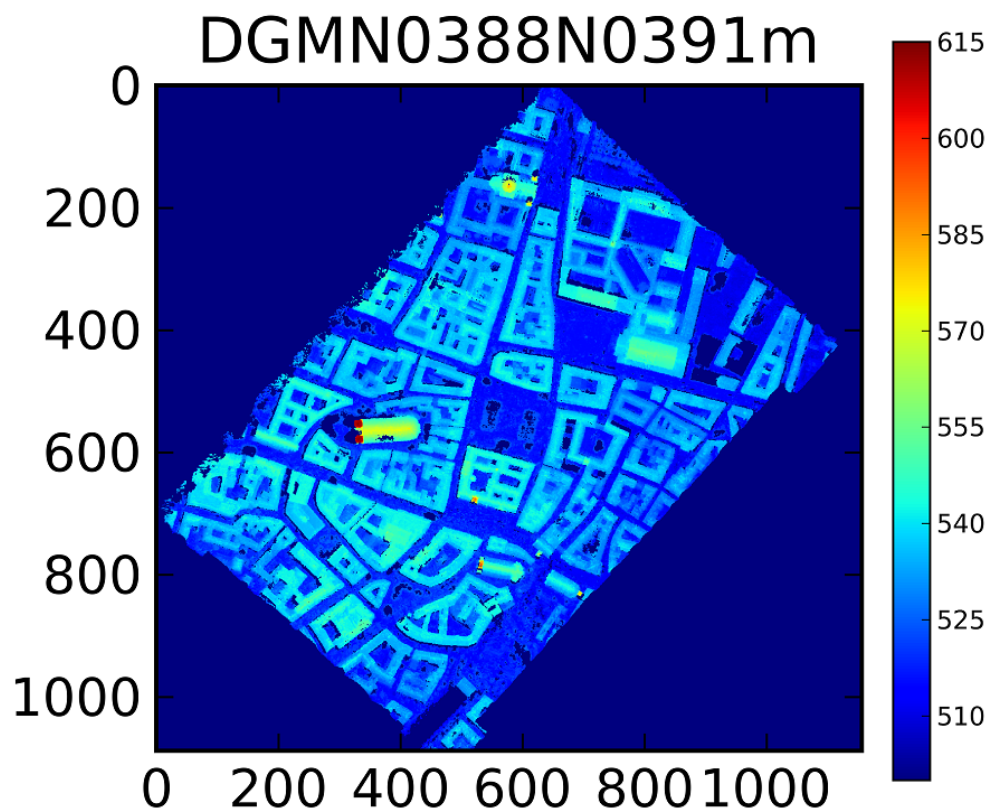


Abbildung 4.11: Das digitale Oberflächenmodell (aus Bildpaar N0388 N0391)

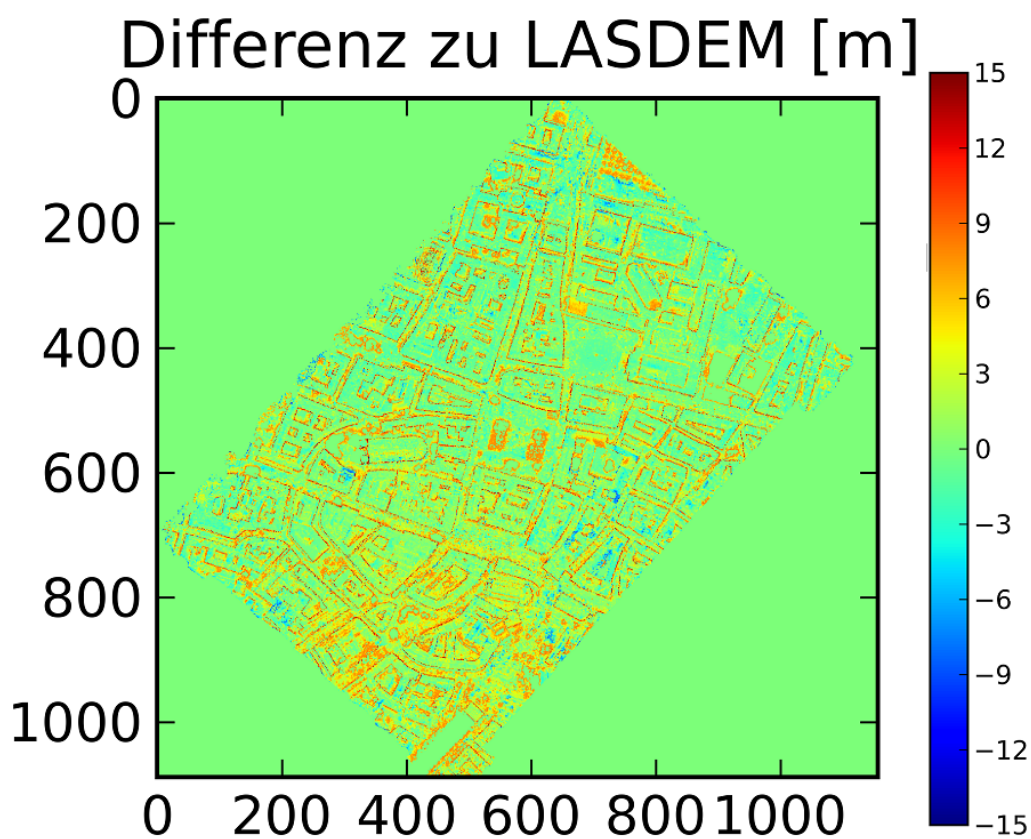


Abbildung 4.12: Differenzbild, DOM aus 3K – DOM aus Laserdaten



### 4.3.1.3 Ergebnis aus einem Bildpaar der seitwärtsblickenden Kamera

In der Abbildung 4.13 werden aus dem Bildpaar B0355 und B0359 berechnete DOM und das Differenzbild zur Referenz gezeigt. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Nadirkamera ist der Abdeckungsbereich des DOMs größer. Im Differenzbild sind stärkere systematische Abweichungen sichtbar. Die Genauigkeit des DOMs aus Seitblick-Kamera ist schlechter. Interessant ist der deutliche Unterschied zwischen dem linken oberen Bereich und dem rechten unteren Bereich. Das ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass sich die Auflösung am Boden wegen der Schrägblickrichtung ändert.

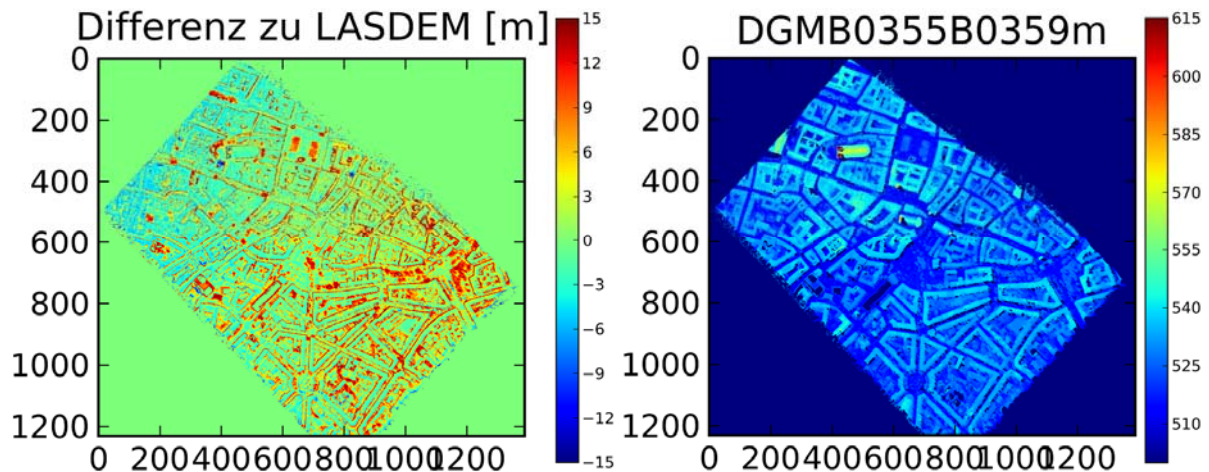


Abbildung 4.13: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355 und B0359

### 4.3.2 Absolute Genauigkeit bei unterschiedlicher Basislänge

Im Abschnitt 4.2.1.2 wird der Einfluss der Matchinggenauigkeit auf die Genauigkeit des DOMs theoretisch analysiert. Unter Annahme einer konstanten Genauigkeit des Matchings hängt die Genauigkeit des DOMs nur von der Basislänge ab. In diesem Abschnitt werden die DOMs aus Bildpaare mit verschiedener Basislänge gezeigt. Das Referenzbild ist immer B0355. Die zugeordneten Bilder sind B0356 bis B0371. Es wird die gleiche Farbskala wie in Abbildung 4.13 verwendet.

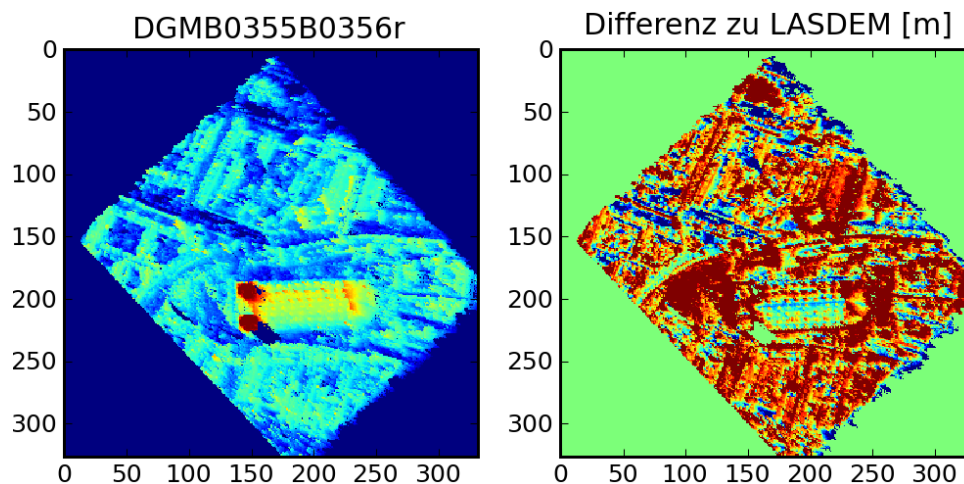


Abbildung 4.14: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355, B0356

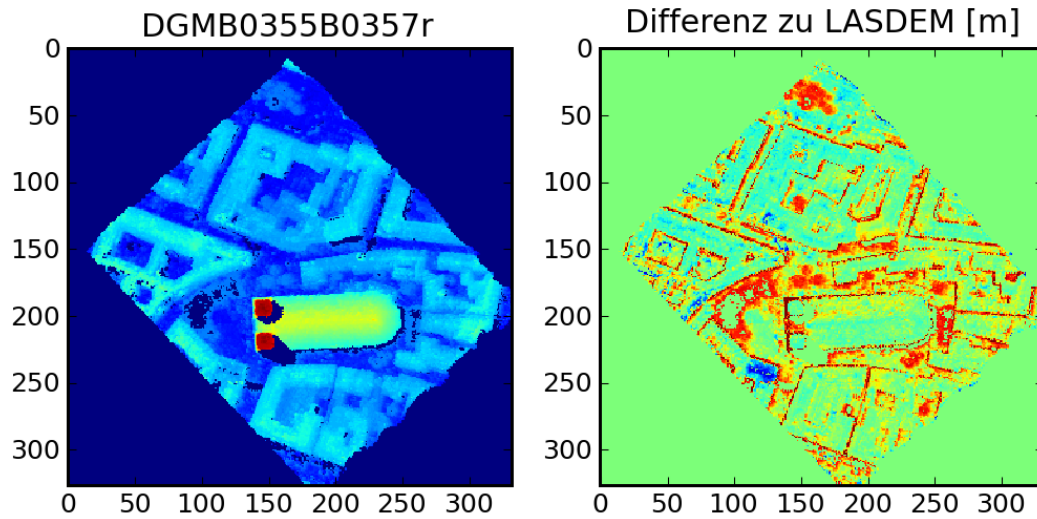


Abbildung 4.15: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355, B0357

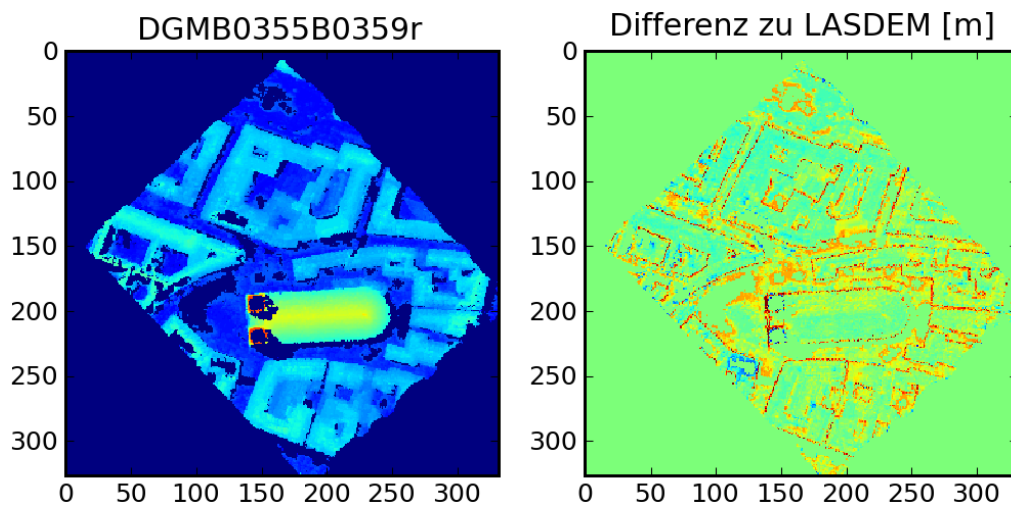


Abbildung 4.16: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355, B0359

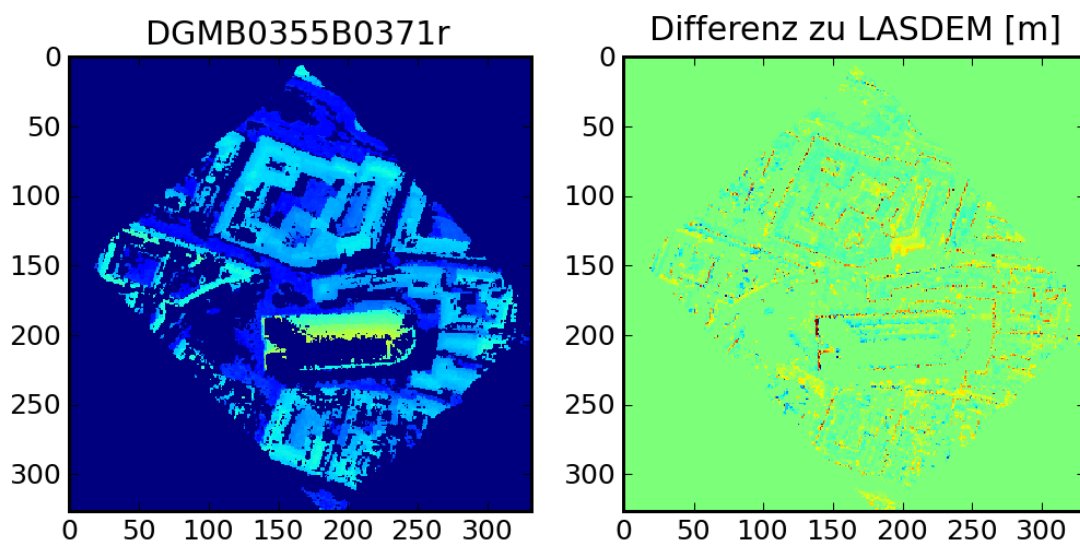
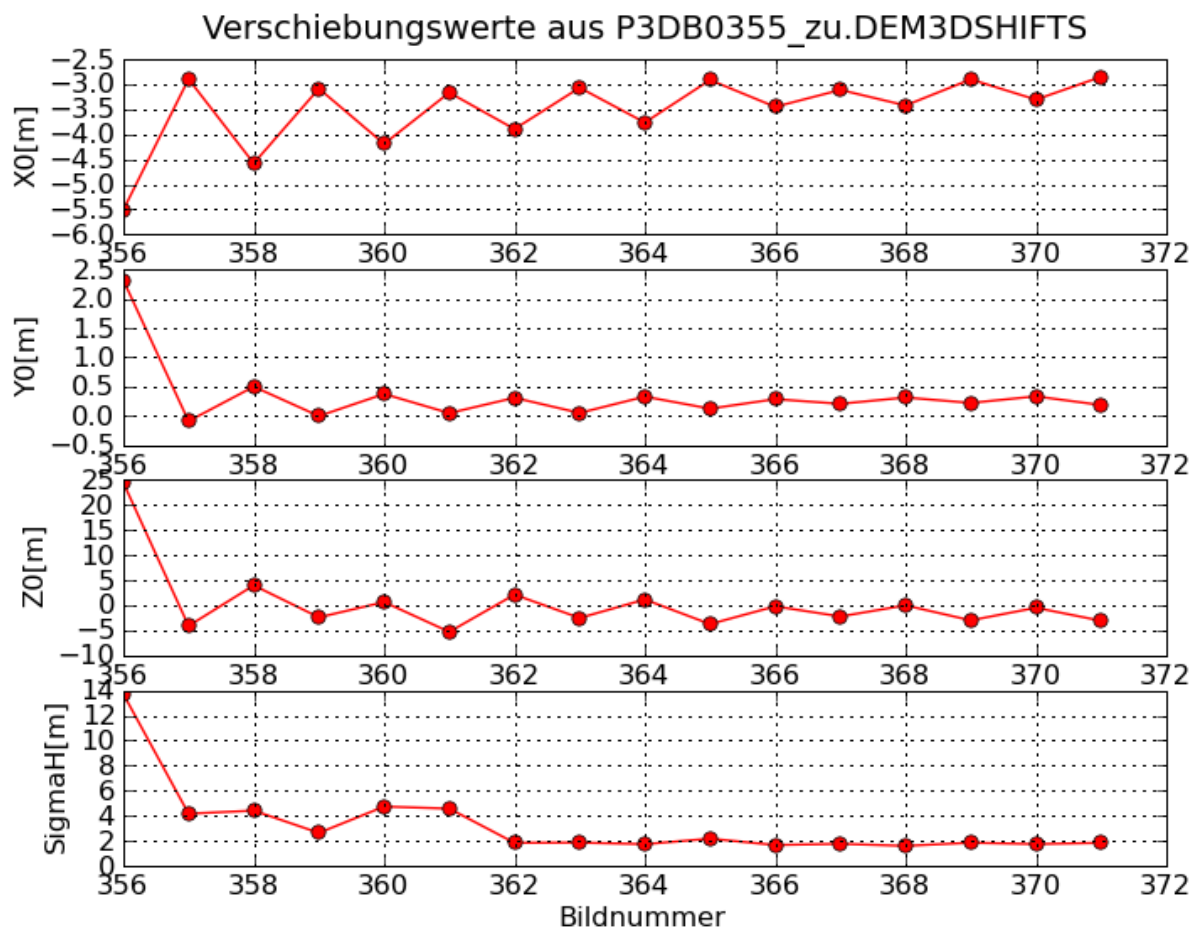


Abbildung 4.17: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355, B0371

Von Abbildung 4.14 bis Abbildung 4.17 werden nur Ergebnisse aus 4 Bildpaaren gezeigt. Von den 4 Abbildungen ist es zu erkennen, dass die Genauigkeit des DOMs sich mit der Erhöhung von Basislänge verbessert und die Vollständigkeit hingegen abnimmt.

Für die Punktwolken aus jedem Bildpaar wird die Translation zu dem Referenz DOM berechnet. Die Translationen in X, Y, und Z-Richtungen sowie die Standardabweichung der Höhendifferenzen ( $\sigma_H$ ) werden in Abbildung 4.18 dargestellt. Die Translationen beschreiben die absolute Genauigkeit des DOMs. In der Abbildung ist es zu erkennen, dass die Werte X und Z um eine Konstante schwanken. Das liegt vielleicht daran, dass die Messungen des IMU-Systems nicht so genau sind. Die Werte  $\sigma_H$  verringern sich bei der Erhöhung von Basislänge langsam. Dies stimmt mit dem Ergebnis von Abbildung 4.3 überein.



**Abbildung 4.18: Translation sowie die Standardabweichung der Differenzen zwischen DOM aus 16 Bildpaare und DOM aus Laserdaten**

### 4.3.3 Fusionierung von DOMs

Da SGM nur für Bildpaare (statt Mehrbildzuordnung) optimale Ergebnisse liefert ([13]), müssen die Ergebnisse (Punktwolken) mehrerer Bildpaare fusioniert werden.

Wegen der beschränkten Genauigkeit des GPS-IMU-System und des Einflusses von anderen Faktoren (z.B. Kalibrierung) aus dem Datensatz „München Zentrum“, stimmen die Punktwolken aus verschiedenen Bildpaaren nicht überein. Es gibt normalerweise eine leichte Translation zwischen verschiedenen Punktwolken. Für die Fusionierung der Ergebnisse des



Datensatzes „München Zentrum“ werden die Punkte vor der Fusionierung korrigiert. Ein XDibias Module „dem3dshift“ wird verwendet, um die 3D Translationen zwischen der Punktwolke und einem Referenz DOM zu berechnen. Mit den berechneten Translationen wird die Punktwolke dann korrigiert und zusammen in eine Datei geschrieben.

Für Standard photogrammetrische Verfahren sollte eine Bündelblockausgleichung mit Passpunkten verwendet werden, um die äußere Orientierungsparameter aller Bilder zu korrigieren. Dies führt dann dazu, dass es keine Translation zw. Punktwolken aus verschiedenen Bildpaaren gibt. Für die Echtzeit-Prozessing ist die Bündelblockausgleichung aller Bilder oder die Benutzung von Passpunkten nicht möglich. Es können nur die bisher aufgenommenen Bilder und Verknüpfungspunkte in der Bündelblockausgleichung eingesetzt werden. In dieser Diplomarbeit wurde dies aus Zeitmangel nicht implementiert.

Die Korrektur der Punktwolke anhand des Referenz-DOM wird nur für den Datensatz „München Zentrum“ durchgeführt. Für den Datensatz „Vaihingen Enz“ ist dies wegen der Bestimmung der äußeren Orientierung mittels Bündelblockausgleichung nicht notwendig.

#### 4.3.3.1 Vergleich der Fusionsverfahren

Im Abschnitt 3.6 wurden kurz die fünf Modi der DOM vorgestellt. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus den fünf Modi für die lagekorrigierten DOMs aus dem Abschnitt 4.3.2 gezeigt. Die Farbskala sind gleich wie die in Abbildung 4.13, also 500 bis 615m für DOM und -15 bis 15m für das Differenzbild.

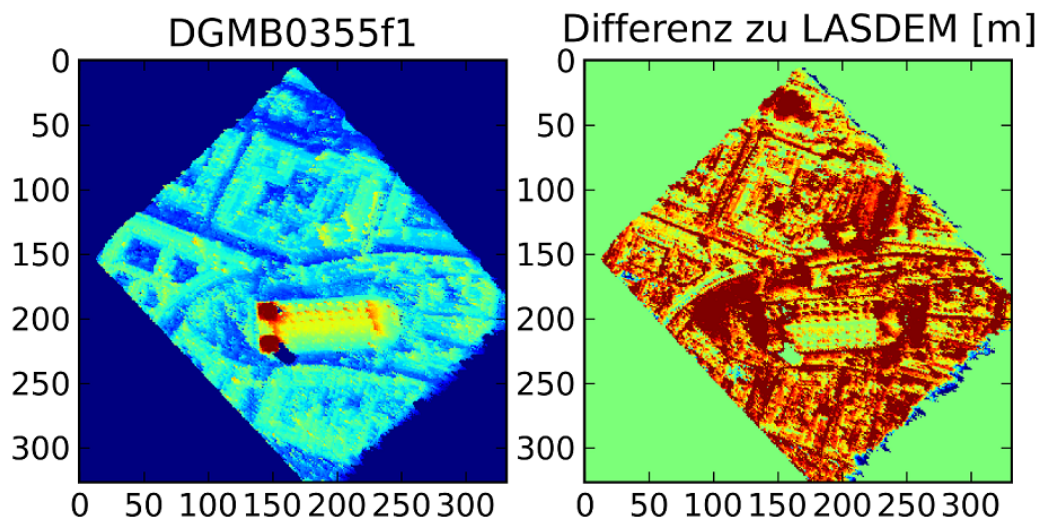


Abbildung 4.19: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode1: Maximum)

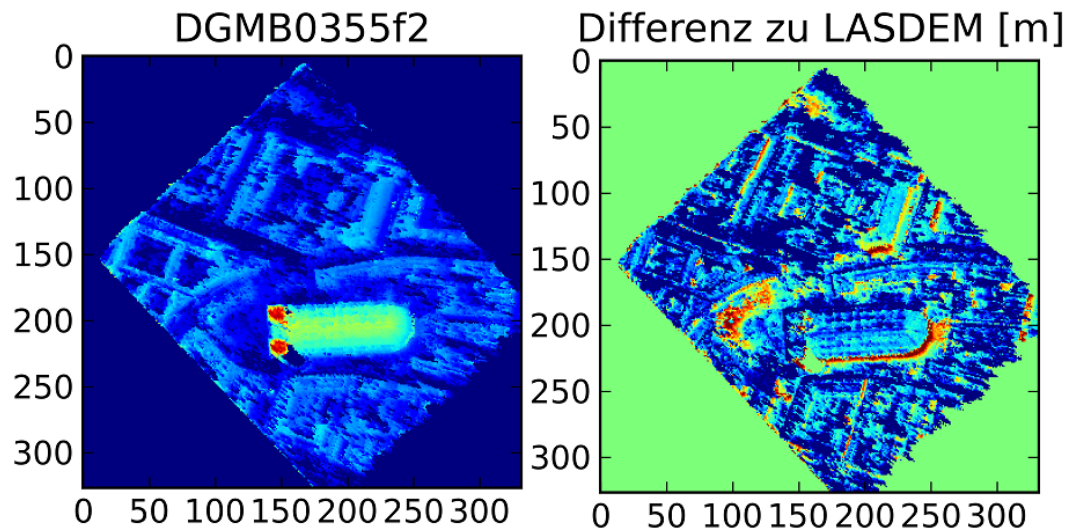


Abbildung 4.20: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode2: Minimum)

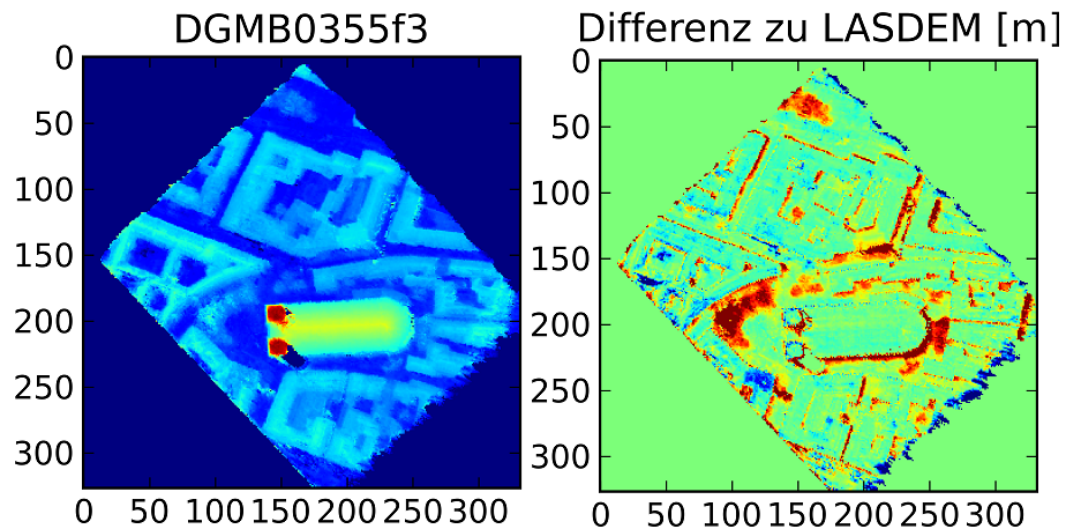


Abbildung 4.21: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode3: Mittelwert)

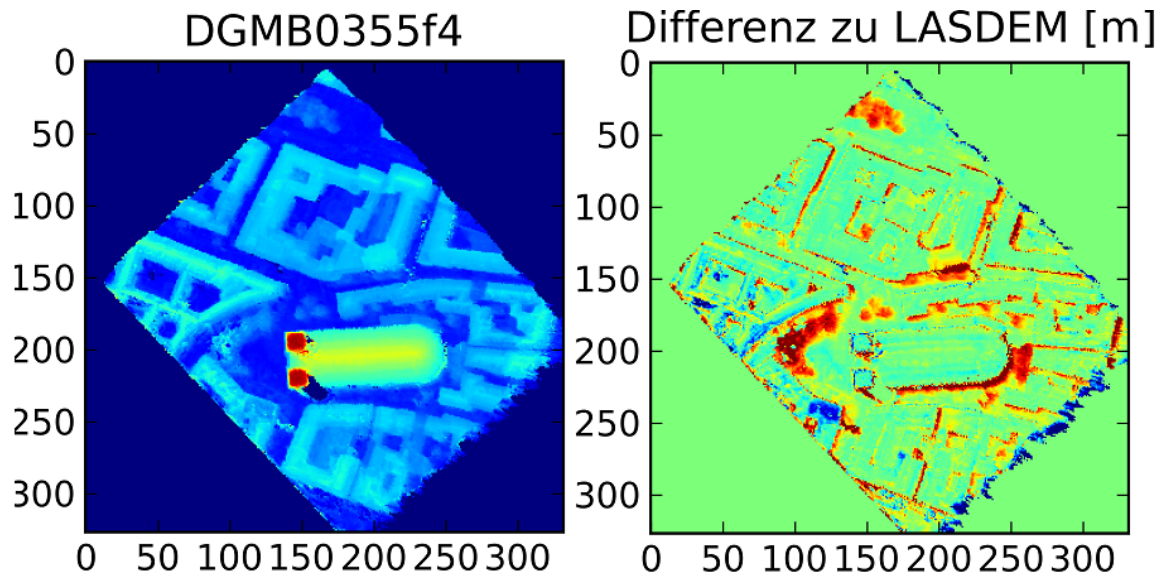


Abbildung 4.22: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode4: Gewichteter Mittelwert)

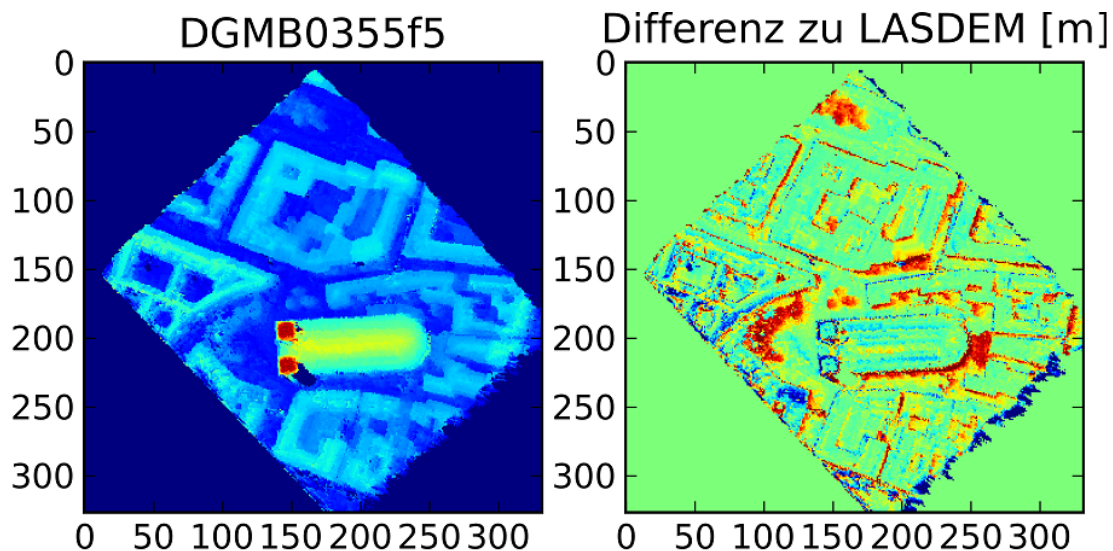


Abbildung 4.23: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode5: Werte mit bester Genauigkeit)

Auf den obigen fünf Abbildungen ist klar zu erkennen, dass die Ergebnisse aus Mode 3 (Mittelwert) und Mode 4 (gewichtete Mittelwert) am besten sind. Wegen der Ausreißer sind die Höhenwerte für Mode 1 (Maximum) und Mode 2 (Minimum) entweder zu hoch (rot dargestellt) oder zu niedrig (blau dargestellt). Die Ergebnisse von Mode 5 (Werte mit bester Genauigkeit) rauschen stärker.

#### 4.3.3.2 Genauigkeits- und Vollständigkeitsuntersuchung des fusionierten DOMs

In der Tabelle 4.1 wird der Zusammenhang zw. Genauigkeit, Vollständigkeit und Basislänge gezeigt. Die Basislänge zwischen 105m bis 245 ist empfehlenswert. Für praktische Untersuchungen wird hier die Basislänge 175m festgelegt, dies entspricht 5 Basiseinheiten (35m). Für die Befliegung im München Zentrum gibt es eine Bildsequenz N0388 bis N0398



ohne Flugpause und deshalb ohne Genauigkeitssprung. Die Bilder N0388, N0393, N0398 wurden für die Fusionierung ausgewählt. Die Abbildung 4.24 stellt das generierte DOM und Differenzbild aus Bildpaar N0388, N0393 dar. Für die Untersuchung wird ein Bereich in dem DOM mit Polygon definiert. Die Differenzwerte innerhalb dieses Polygons wurden statistisch analysiert.

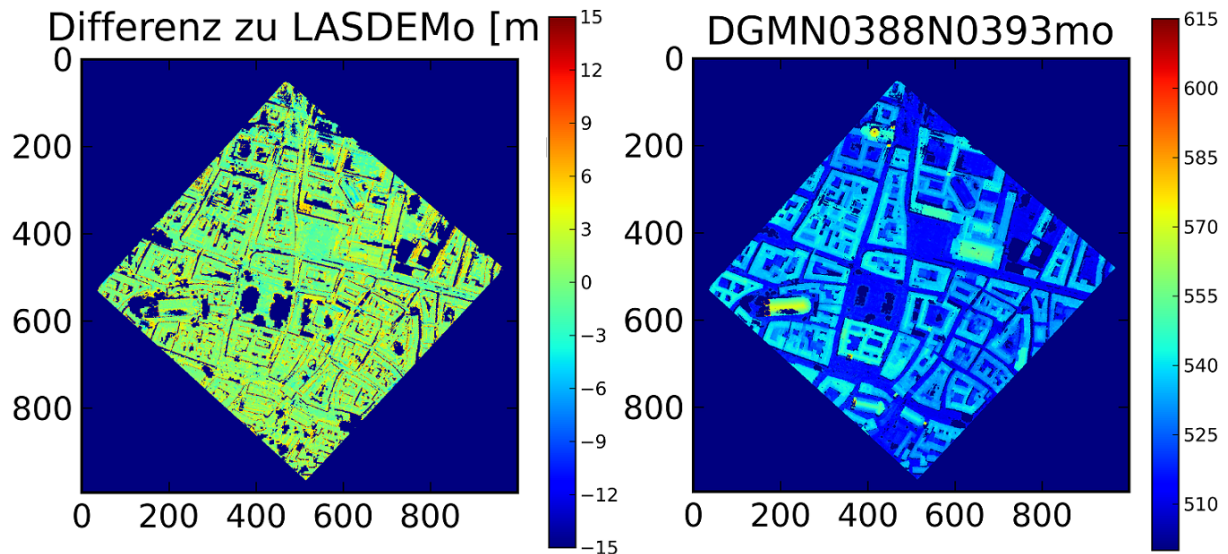


Abbildung 4.24: DOM und Differenzbild aus Bildpaar N0388, N0393

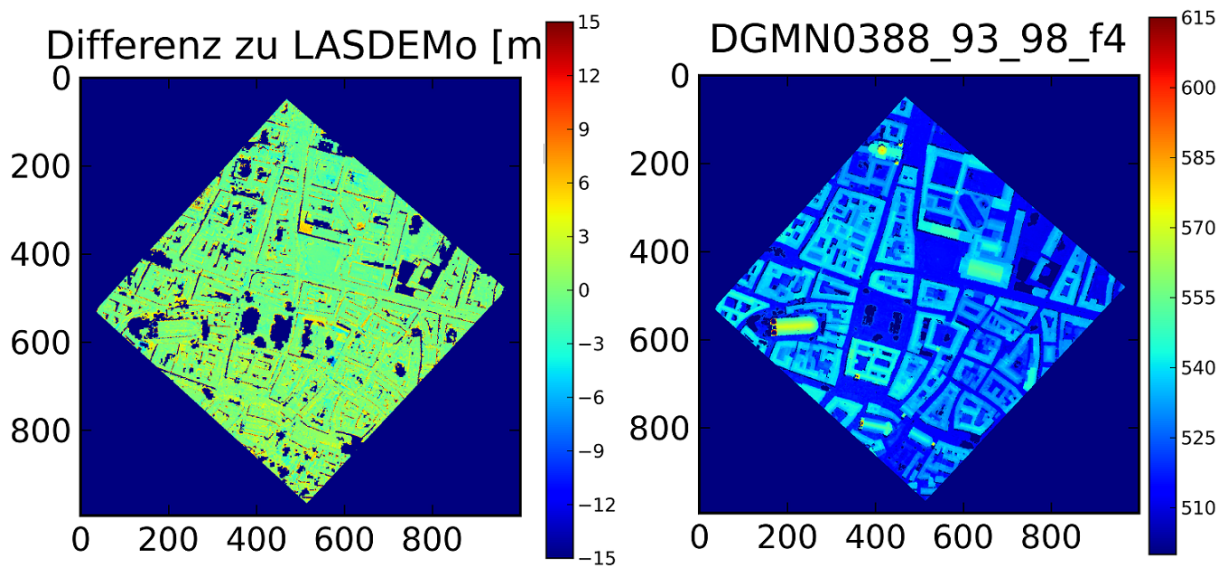


Abbildung 4.25: DOM und Differenzbild des fusionierten DOM

Die Fusionierung wird mit verschiedenen Kombinationen durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Tabelle 4.4 gezeigt. Die Abbildung 4.25 stellt nur das Ergebnis der Fusionierung von DOM aus den Bildpaaren N0388-N0393, N0393-N0398, N0388-N0398 dar. Im Vergleich zu der Abbildung 4.24 ist die Vollständigkeit und Genauigkeit des Differenzbildes in Abbildung 4.25 deutlich besser.

In Tabelle 4.4 ist es zu erkennen, dass die Fusionierung von DOMs aus verschiedenen Basislängen die Genauigkeit verbessert. Die Fusionierung des DOMs aus gleicher Basislänge verbessert die Vollständigkeit.

Bildpaar	Skizze	Mittelwert [m]	Std.[m]	Vollständigkeit
N0388 N0393	↔	1.00	2.67	86.4%
N0393 N0398	↔	0.32	2.57	88.3%
N0388 N0398	↔	0.33	1.72	78.7%
N0388 N0398 N0388 N0393	↔↔	0.28	2.10	88.5%
N0388 N0393 N0393 N0398	↔↔↔	0.33	2.40	92.4%
N0388 N0393 N0393 N0398 N0388 N0398	↔↔↔↔	0.36	2.27	92.8%

Tabelle 4.4: Statistische Untersuchung der Ergebnisse der Fusionierung (Nadir Bilder)

In der Tabelle 4.5 werden die Ergebnisse der Fusionierung aus Bildern von Rückblickkamera gezeigt. Nach Fusionierung von DOMs aus drei Bildpaare erhöht sich die Vollständigkeit bis zu 97.4%. Die Genauigkeit verbessert sich aber nur leicht.

Bildpaar	Skizze	Mittelwert [m]	Std.[m]	Vollständigkeit
B0355 B0360	↔	0.20	5.38	88.4%
B0360 B0365	↔	-0.19	5.11	89.3%
B0365 B0370	↔	1.57	5.34	87.6%
B0355 B0365	↔	0.38	4.73	77.4%
B0360 B0370	↔	0.53	2.76	72.1%
B0355 B0370	↔	0.34	2.98	66.7%
B0355 B0365 B0355 B0360	↔↔	0.52	5.05	91.8%
B0355 B0360 B0360 B0365	↔↔↔	0.07	5.09	95.7%
B0355 B0360 B0360 B0365 B0365 B0370	↔↔↔↔	1.15	5.17	97.4%

Tabelle 4.5: Statistische Untersuchung der Ergebnisse der Fusionierung (rückwärtsblickende Bilder)

## 4.4 Analysieren

Drei Elemente eines digitale Oberflächenmodell sind wichtig: absolute Genauigkeit, relative Genauigkeit und Vollständigkeit. Nach den theoretischen und praktischen Untersuchungen in Abschnitt 4.2 und 4.3 mit dem Datensatz München Zentrum ergibt sich folgende Bewertung.

### 4.4.1 Absolute Genauigkeit

Die absolute Genauigkeit eines DOMs wurde durch die Translationen zu einem Referenz DOM berechnet. Die absolute Genauigkeit hängt von der Kalibrierung sowie die Navigationsdaten ab. Die Bestimmung der Boresight-Winkeln und die Messung des IMU-System spielen eine wichtige Rolle.

#### 4.4.2 Relative Genauigkeit

Die relative Genauigkeit eines DOMs kann aus dem Differenzbild des lage-korrigierten DOM und des Referenz DOM berechnen werden. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen zeigt die relative Genauigkeit. Die höchsten Höhendifferenzen liegen meistens im Kantenbereichen. Das ist vielleicht darauf zurückzuführen, dass die Schattenbereiche in der Nähe von Kanten mit unterschiedlichen Grauwerten in verschiedene Bilder dargestellt werden. Eine schlechte Lagegenauigkeit kann auch zu diesem Fehler führen.

#### 4.4.3 Vollständigkeit

Die Vollständigkeit kann aus dem Differenzbild berechnet werden. Die erkannten Fehlzuordnung des SGM und die geometrische Abdeckung beeinflussen die Vollständigkeit eines DOMs. Erkannte Fehlzuordnungen werden meist durch glatte Oberflächen oder Bewegung von Fahrzeugen und Menschen verursacht. In Bäumen gibt es auch Fehlzuordnungen. Die Vollständigkeit wird durch Fusionierung des DOMs aus mehreren Bildpaaren verbessert. Das fusionierte DOM wird weiter mit Interpolationsverfahren bearbeitet und liefert schließlich ein vollständiges DOM.

## 5 Evaluation der DOMs aus Datensatz Vaihingen-Enz

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, ist die absolute Genauigkeit des generierten DOMs aus 3K-Bilder nicht so gut. Im Vergleich zu der LASDEM gibt es 3m Verschiebung in der Lage. Die Idee in diesem Abschnitt ist es zu testen, ob es Fehler in dem Algorithmus gibt, und ob die Ungenauigkeiten auf die nicht gut bestimmte äußere Orientierung zurückzuführen sind.

In dieser Diplomarbeit werden Bilder von der DMC, der UltraCam-X und der DLR 3K Kamera in Rahmen des DGPF-Projekts verwendet. Diese Bilder wurden alle im Testgebiet Vaihingen Enz aufgenommen. Das Testgebiet verfügt über mehrere, gut verteilte Passpunkte, die mit GPS Verfahren gemessen worden sind. Alle Datensätze wurden mit Hilfe der Passpunkte kalibriert und die äußeren Orientierungen werden mit Hilfe dieser Passpunkte geschätzt. Prinzipiell sollte es keine Systemfehler in der äußeren Orientierung geben.

### 5.1 Datensätze

Im Rahmen des DGPF-Projekts [14] wurden folgende Datensätze ausgeliefert:

#### 5.1.1 DMC GSD 20cm

Die Bilder der DMC Kamera mit einer Bodenauflösung von 20cm (ground sampling distance [GSD]) haben folgendes Format: RGB virtuelle Bilder, Tiled Tiff uncompressed 48 bit/pix 7680×13824 (Spalten × Zeilen), 818 Mbyte/Bild.

Bei der Generierung der virtuellen Bilder werden alle geometrischen Verzeichnungen und Fehler eliminiert. Deswegen sind die visuelle Bilder verzeichnungsfrei und haben folgende inneren Orientierungsparameter: Kamerakonstante,  $c = 0.12\text{m}$ , Pixelgröße  $P_s = 12\mu\text{m}$ , Bildhauptpunkt  $x_0 = 0$  und  $y_0 = 0$ .

Für die äußeren Orientierungsparameter hat das Institut für Photogrammetrie (ifp) der Universität Stuttgart sogenannte Soll-Orientierungen für die Systeme DMC und Ultracam-X generiert. Die Soll-Orientierung beruht auf einer Aerotriangulation mit manuell und automatisch gemessenen Punkten unter Verwendung aller Passpunktinformationen im Objektraum. Eine genauere Beschreibung von Soll-Orientierungen kann man auf Seite 9 von [14] ausführlich sehen. Die Soll-Orientierungsdaten kann man online unter [16] downloaden. Die Orientierungsparameter sind unterschiedlich definiert als BLUT und PATB Format.

#### 5.1.2 Ultracam-X GSD 8cm

Die Bilder aus Ultracam-X mit Bodenauflösung 8cm haben folgendes Format: RGB virtuelle Bilder, Tiled Tiff uncompressed 24 bit/pix 9420×14430 (Spalten × Zeilen), 537 Mbyte/Bild.

Die nach Pansharpening generierten hoch auflösenden Bilder haben folgende innere Orientierungsparameter: Kamerakonstante,  $c = 100.500\text{mm}$ , Pixelgröße  $P_s = 7.200\mu\text{m}$ , Bildhauptpunkt  $x_0 = 0.000\text{ mm}$  und  $y_0 = 0.144\text{ mm}$ .

Für die äußeren Orientierungsparameter kann man ähnlich wie bei den DMC-Bilder auch die Soll-Orientierungsparameter benutzen.

### 5.1.3 3K-Kamera GSD 20cm

Die Bilder der DLR 3K-Kamera mit einer Bodenauflösung von 20cm haben folgendes Format: RGB Bilder, XDibias Format 24 bit/pix 4992×3328 (Spalten × Zeilen), 15 Mbyte/Bild.

Die inneren Orientierungsparameter sind a priori durch eine Kalibrierung bestimmt worden: Kamerakonstante,  $c = 51.3437\text{mm}$ , Pixelgröße  $P_s = 7.212\text{ }\mu\text{m}$ , Bildhauptpunkt  $x_0 = -0.04386\text{ mm}$  und  $y_0 = -0.01765\text{ mm}$ . Die beiden radialsymmetrischen Verzeichnungsparameter sind  $A_1 = -53.671243$   $A_2 = 25418.569$ . Alle anderen Verzeichnungsparameter wurden nicht modelliert.

Die äußeren Orientierungsparameter wurden nach der Ausgleichung mit allen Passpunkten bestimmt.

### 5.1.4 ALS50

Um die Genauigkeit der generierten DOMs zu analysieren, wurden LiDAR-Daten als Referenzdaten für das DGPF-Projekt am 21.8.2008 erfasst. Die Befliegung erfolgte mit einem ALS50 System und mit einer Punktdichte von 5 Punkten/m<sup>2</sup> sowie einem mittleren Punktabstand von ca. 70cm in bzw. 45cm senkrecht zur Flugrichtung. Die Mitglieder der Arbeitsgruppen des DGPF Projekts haben sowohl die gemessene 3D Punktwolke als auch ein daraus abgeleitetes Digitales Oberflächenmodell mit 25cm Rasterweite zur Verfügung gestellt. Die LIDAR-DOMs werden im IMAGINE-Format, 32-Bit mit insgesamt 1.35GB bereitgestellt.

## 5.2 Generierungsprozess

Da die Datenformate der DMC und der Ultracam-X nicht gleich wie bei der 3K-Kamera sind, werden zuerst die Bilder vom Tiff-Format zum XDibias-Format konvertiert. Die Soll-Orientierungsparameter können auch nicht direkt verwendet werden. So muss die Rotationsmatrix in PATB noch mit einer Matrix  $[-1, 0, 0; 0, -1, 0; 0, 0, 1]$  multipliziert werden, da vor der Kamerakonstanten ein Minuszeichen in der Kameramatrix benutzt wird.

Die Bildkoordinatensysteme der DMC und Ultracam-X Kamera sind unterschiedlich definiert als die der 3K-Kamera. Deswegen wurde ein spezielles Programm ‚epipolarDMC.py‘ geschrieben, um Epipolarbilder für die DMC Kamera und für die Ultracam-X Kamera zu generieren. Die daraus generierten Epipolarbilder haben dann die gleichen Eigenschaften wie die der 3K-Kamera, d.h. gleiches Koordinatensystem (x nach oben, y nach links) und gleiche Richtung der Epipolarlinien (Spaltenweise). Gleichzeitig werden zwei Dateien `_interior` und `_exterior` für die inneren sowie für die äußeren Orientierungsparameter generiert. Alle anderen Programme bleiben gleich wie bei der 3K-Kamera.

Wegen des deutlich größeren Bildformats dauert für die DOM-Generierung viel länger. Sonst gibt es kaum Unterschiede im Vergleich zur 3K-Kamera.

Wegen der schlechten Bestimmung der äußeren Orientierung funktioniert die Generierung von Epipolarbildern für den Datensatz „München Zentrum“ für die 3K-Kamera bei unterschiedlicher Kamera, sowie unterschiedliche Befliegungstreifen nicht ausreichend gut. Mit den DMC und Ultracam-X Bilder können Epipolarbildpaare aus verschiedenen Streifen prozessiert werden.



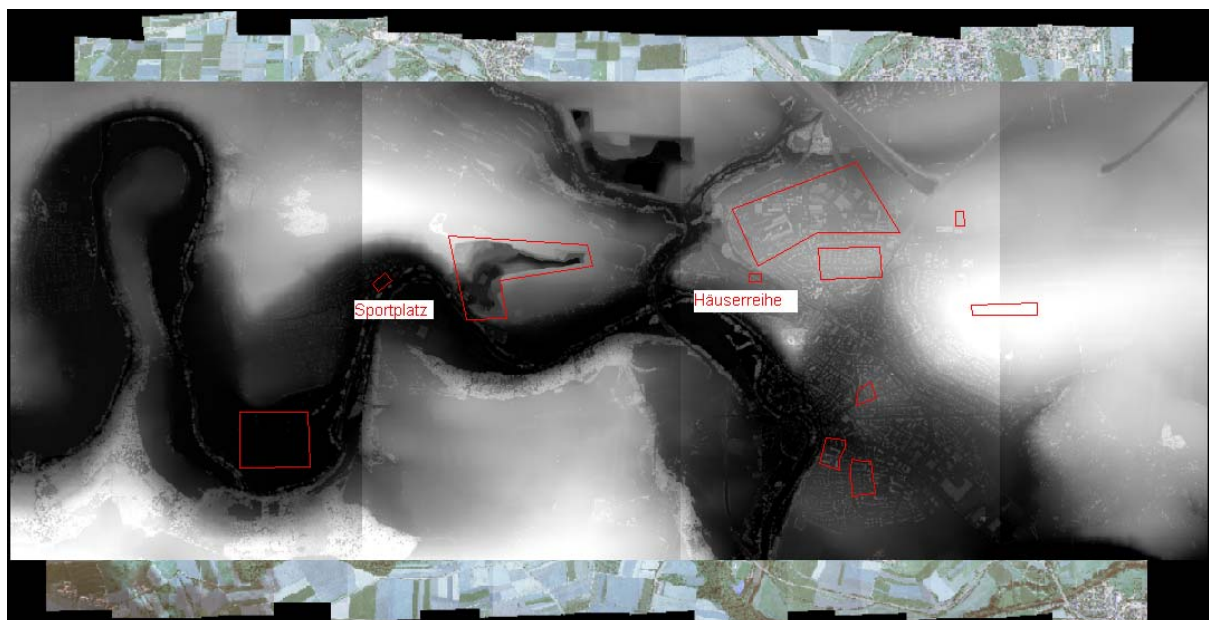
Das Format der äußeren Orientierungsparameter des 3K-Bilder in Vaihingen-Enz ist weder gleich wie das von München-Daten noch gleich wie den von DMC. Für die 3K Kamerabilder in Vaihingen/Enz Daten ist hier die Bestimmung der Boresight-Winkel nicht notwendig, da man anhand der Formel (5.1) und den bestimmten äußeren Orientierungsparametern direkt die Konvertierung vom Bildkoordinatensystem in das Objektkoordinatensystem berechnen kann.

$$R = R_2(-\varphi)R_1(-\omega)R_3(-\kappa)R_3(-\pi/2) \quad (5.1)$$

## 5.3 Analyse und Bewertung der Ergebnisse

### 5.3.1 Überblick über das Testgebiet sowie über die Untersuchungsbereiche

Die ALS50-Daten wurden auf das zentrale Gebiet des Testfeld Vaihingen Enz beschränkt. Innerhalb dieses Gebiets hat die Arbeitsgruppe „Höhenmodelle“ des DGPF-Projekts verschiedene Untersuchungsbereiche wie z.B. einen Steinbruch, einen Sportplatz, ein Feld und ein bebautes Gebiet definiert, um die Qualität der DOMs getrennt für unterschiedliche Bildtextur und Oberflächentopographien untersuchen zu können ([15]). In dieser Diplomarbeit werden die Genauigkeitsuntersuchungen im Sportplatz durchgeführt. Außerdem werden überblicksweise DOMs einer Häuserreihe untersucht. Das aus 3K-Daten generierte Orthophoto mit verfügbarem Referenz-DOM und markierten Untersuchungsbereich ist in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abbildung 5.1: Orthophoto für das Testgebiet Vaihingen-Enz aus 3K-Daten mit verfügbarem Referenz-DOM und markierten Untersuchungsbereichen**

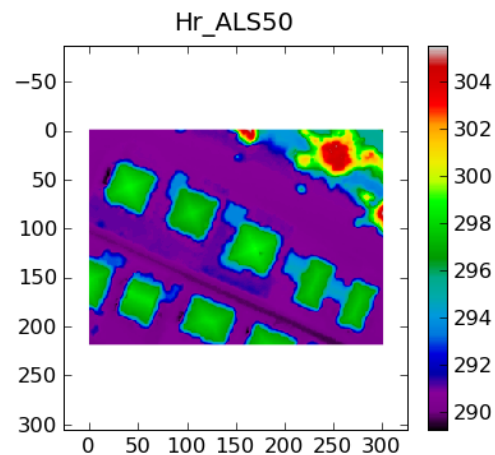
### 5.3.2 Visuelle Evaluierung in einem Stadtgebiet

In diesem Abschnitt wird eine visuelle Evaluierung in einem Stadtgebiet durchgeführt. Dafür wurde ein Bereich mit dichter Bebauungsart gewählt. Der Bereich enthält eine Häuserreihe mit kleineren Gebäuden mit einer Breite von 7m bis 12m. Dieses Beispiel ist dasselbe wie das in [15] gewählte Beispiel.

Die DOMs werden mit Bildern der Ultracam-X mit 8cm GSD, der DMC mit 20cm GSD und DLR 3K Kamera mit 20cm GSD berechnet. Für die Generierung der DOMs wurden die Programme gleich wie in Kapitel 3 eingesetzt. Nur die Eingabedateien speziell die äußeren Orientierungsparameter wurden vorher in das Format der 3k-Bilder konvertiert. Zur Darstellung der DOMs wird ein Python-Programm rasterobko.py verwendet, wobei die 3D Punkte für jedes Pixel in DOM-Bild einfach gemittelt wurden. Den Pixel, die keine Punkte enthalten, wird der Hintergrundwert -999 zugewiesen. Die Rasterweite der DOMs wurde auf 25cm - gleich dem Referenz Lidar DOM - festgelegt. Das Referenz DOM und der entsprechende Bildausschnitt aus den Ultracam-X Bildern sind in Abbildung 5.3 und Abbildung 5.2 dargestellt.



**Abbildung 5.2: Ausschnitt aus Ultracam-X Bild (8cm GSD) für die Häuserreihe**

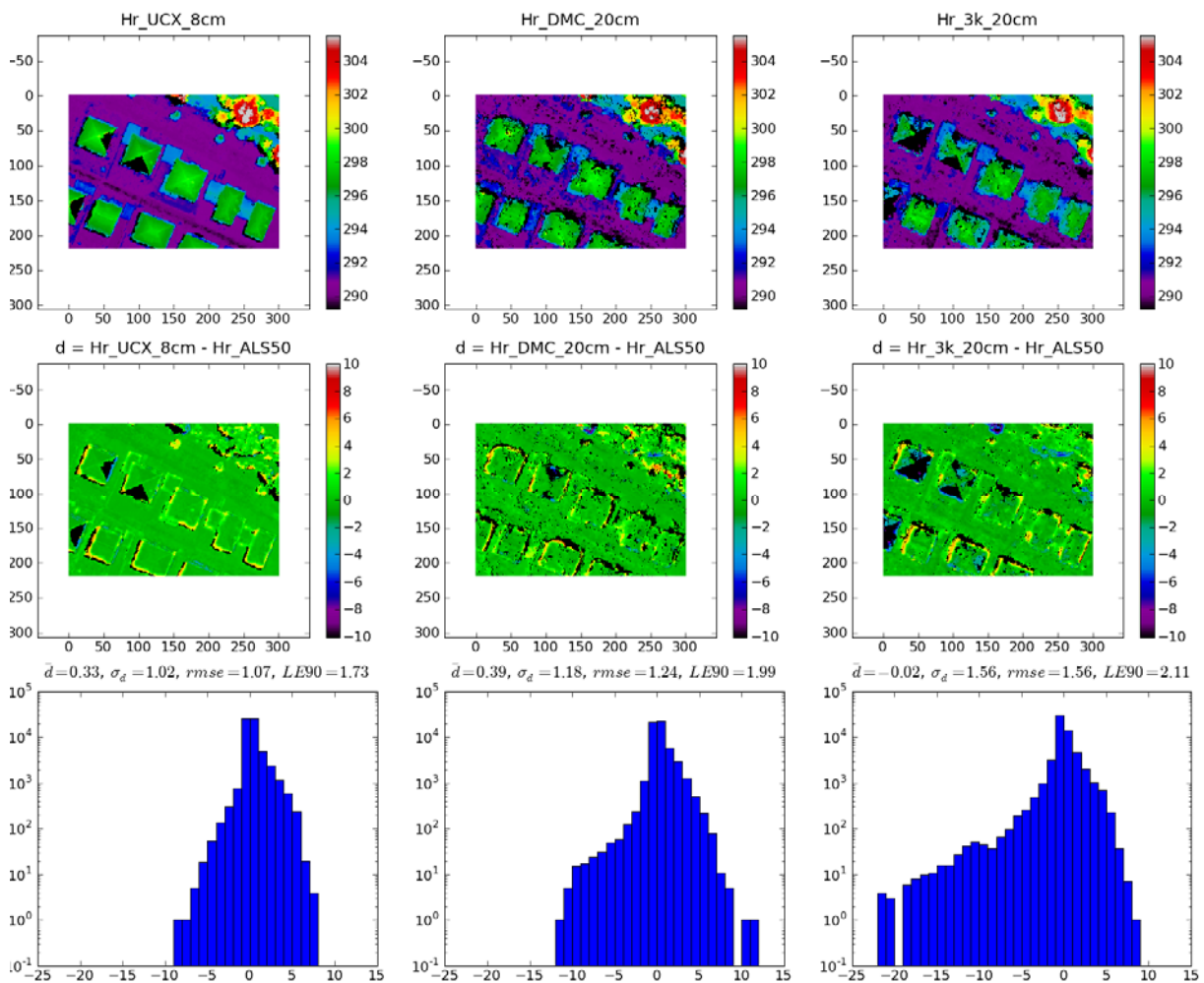


**Abbildung 5.3: Referenz DOM aus ALS50 Daten der Häuserreihe**

Im oberen Drittel der Abbildung 5.4 werden die DOMs jeweils aus Ultracam-X Bildern mit 8cm GSD, DMC Bildern mit 20cm GSD und 3K Bildern mit 20cm GSD dargestellt. Die Lücken in DOMs sind schwarz markiert. Die Mitte der Abbildung 5.4 zeigt die entsprechenden Differenzbilder, die durch Subtraktion des jeweiligen DOMs von dem DOM aus ALS50 entstehen. Das untere Drittel zeigt dann die entsprechenden Histogramme der Differenzwerte, wobei die y-Achse des Histogramms logarithmisch skaliert ist.

Die Abbildung 5.4 zeigt die unterschiedliche Vollständigkeit der DOMs aus verschiedenen Kamerasystemen. Die DOMs mit größerer GSD von DMC und 3K enthalten deutlich mehr und größere Lücken als das DOM der Ultracam-X. Die meisten Lücken befinden sich an den Dächern der Häuser und auf der Straße. Dies ist dadurch erklärbar, dass es auf den Dächern und auf Straßen nur geringe Textur gibt.

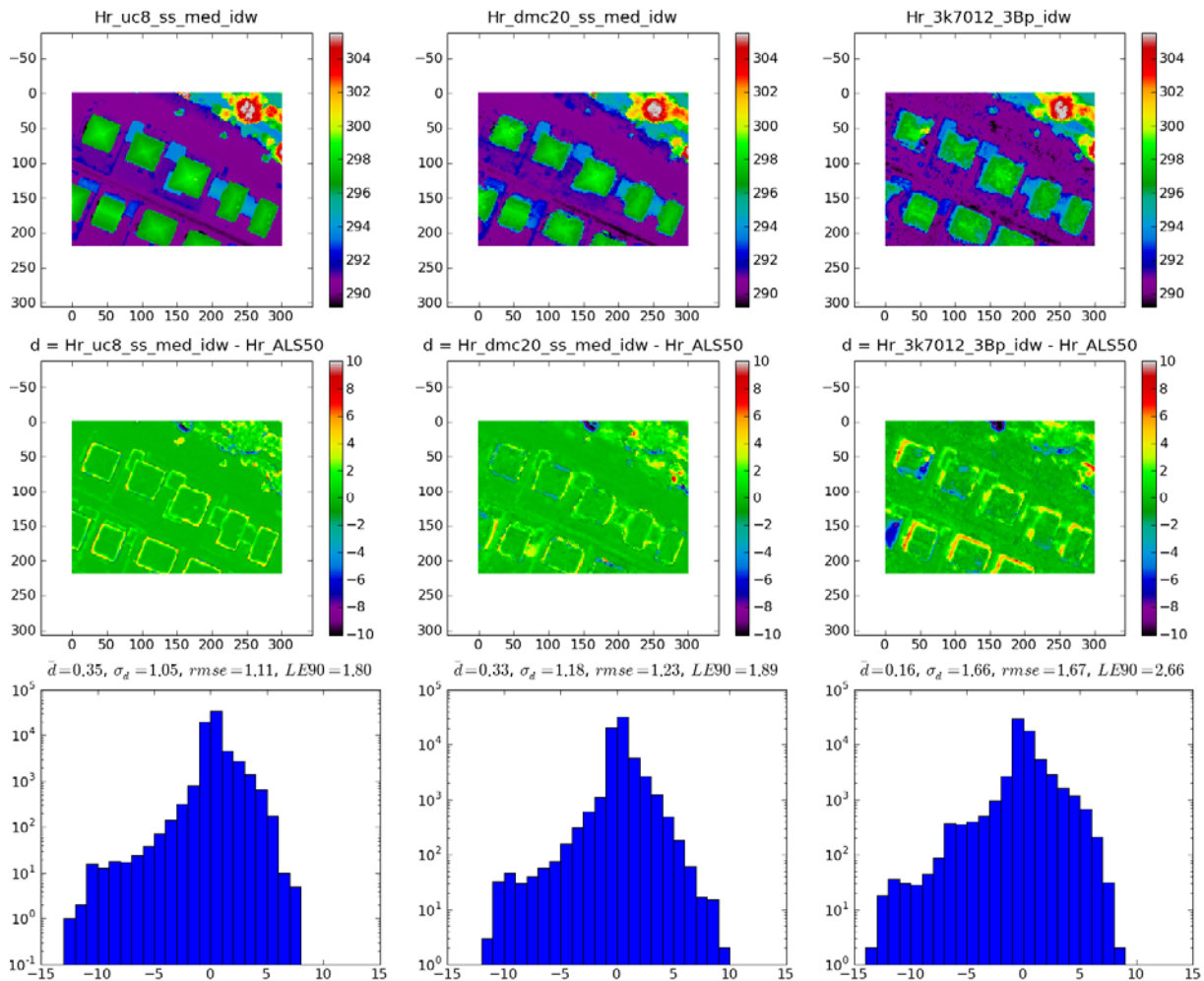
In den Differenzbildern kann man klar erkennen, dass ein Großteil der Fläche mit grün dargestellt ist. Das bedeutet, dass die meisten Differenzen zwischen  $\pm 2\text{m}$  liegen. Die Überschrift über den einzelnen Histogrammen in Abbildung 5.4 enthält folgende Elemente: den Mittelwert der Differenzen ( $\bar{d}$ ), die Standardabweichung der Differenzen ( $\sigma_d$ ), die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (rmse: root mean square error) und den linearen Fehler mit 90% Wahrscheinlichkeit (LE90: linear error with 90% probability). Die Standardabweichung der Differenzen zwischen den DOMs aus DMC 20 GSD und ALS50 beträgt 1.18m, 90% der Differenzen sind kleiner als 1.99m. Im Vergleich dazu beträgt  $\sigma_d$  für 3K 1.56m und LE90 2.11m. Die Histogramme stellen die Häufigkeitsverteilung der Differenzwerte dar.



**Abbildung 5.4: Visueller Vergleich der DOMs einer Häuserreihe aus ein Bildpaar. Reihenfolge von links nach rechts: Ultracam-X 8cm, DMC 20cm, 3K 20cm; von oben nach unten: DOM 25cm Rasterweite, Differenzbild zu Referenz DOM, Histogramm der Differenzen**

Die in Abbildung 5.4 gezeigten DOMs sind alle nur aus einem Bildpaar abgeleitet. Die Häuserreihe wurde mit 15 UCX-Bildern und 6 DMC-Bildern aufgenommen. Eine Fusionierung der DOMs aus den Bildpaaren im gleichen Streifen wurde für UCX und DMC Bilder durchgeführt. Dafür wurden 30 DOMs aus UCX-Bilder, 3 DOMs aus DMC-Bilder und 3 DOMs aus 3K-Bilder generiert. Für die Fusionierung der DOMs wurde der Modus „median“ verwendet. Nach der Fusion ergibt sich ein sehr dichtes DOM, welches aber immer noch kleinere Lücken enthält. Ein digitales Oberflächenmodell mit Lücken kann normalerweise

nicht als endgültiges Ergebnis benutzt werden. Ein Interpolationsverfahren ist notwendig, um die Lücken des DOMs zu füllen. In dieser Diplomarbeit wird das Verfahren der inverse Distanzgewichtung (idw: inverse distance weight) eingesetzt. Eine genauere Erklärung für idw siehe [22]. Die aus mehreren Bildpaaren fusionierten und gefüllten DOMs sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

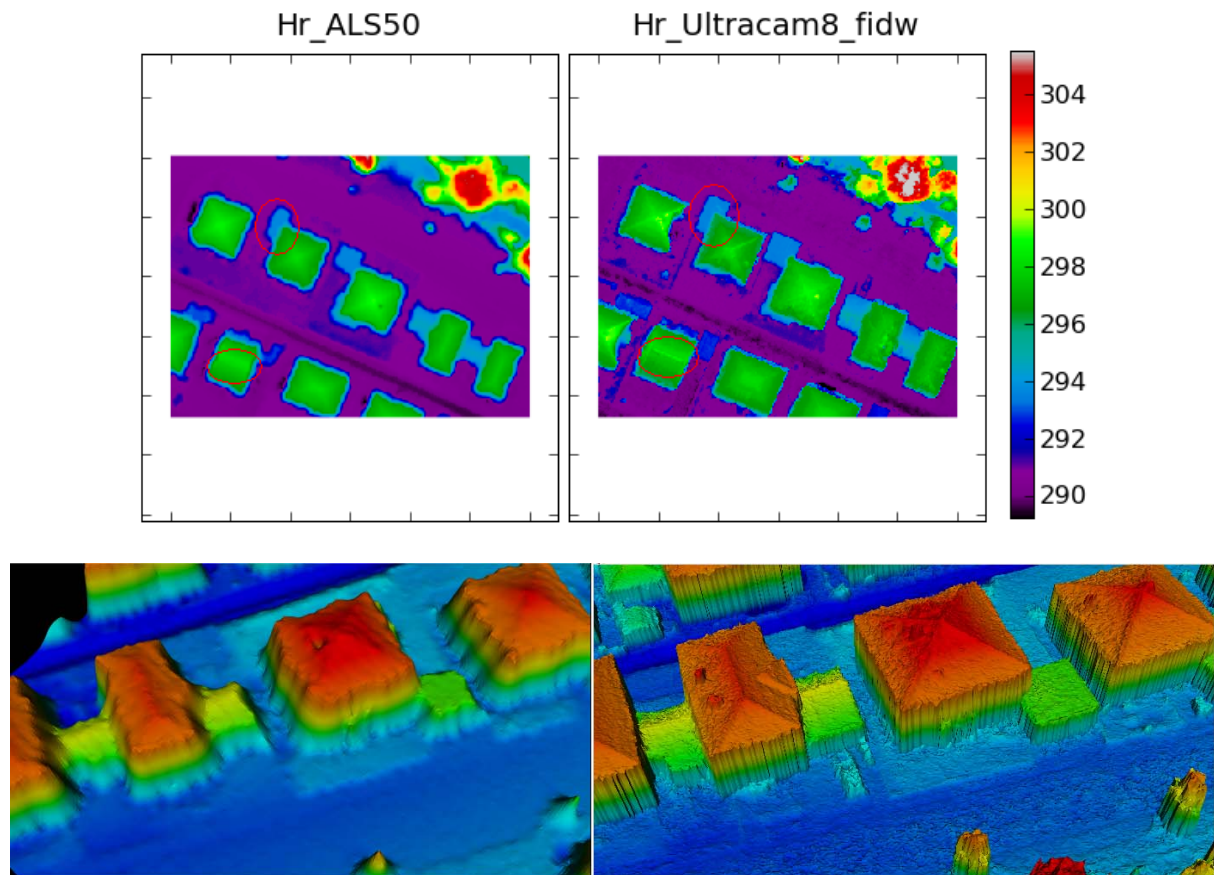


**Abbildung 5.5: Visueller Vergleich der fusionierten und gefüllten DOMs einer Häuserreihe. Reihenfolge von links nach rechts: Ultracam-X 8cm, DMC 20cm, 3K 20cm; von oben nach unten: DOM 25cm Rasterweite, Differenzbild zu Referenz DOM, Histogramm der Differenzen**

Der Vergleich der Abbildung 5.5 mit Abbildung 5.4 zeigt, dass das DOM der Ultracam-X durch die Fusion und die anschließende Interpolation gut gefüllt wurde. Manche Lücken im DOM der 3K sind zu groß, so dass es große Fehler in dem gefüllten DOM gibt. Die Parameter der statistischen Analyse steigern sich nach der Interpolation der DOMs.

Die Darstellung des gefüllten DOM der Ultracam-X 8cm GSD zeigt eine gute Qualität und eine hohe Auflösung der Modelle. Während das Referenz DOM im Allgemeinen eine glattere Struktur zeigt, enthält das DOM der Ultracam-X 8cm GSD im Bereich des Dachs und der Kanten der Häusern mehr Details. Dies kann man besonders in der 3D-Darstellung und den markierten Bereichen in Abbildung 5.6 erkennen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Laserpunktcloud eine relativ geringe Punktdichte hat.

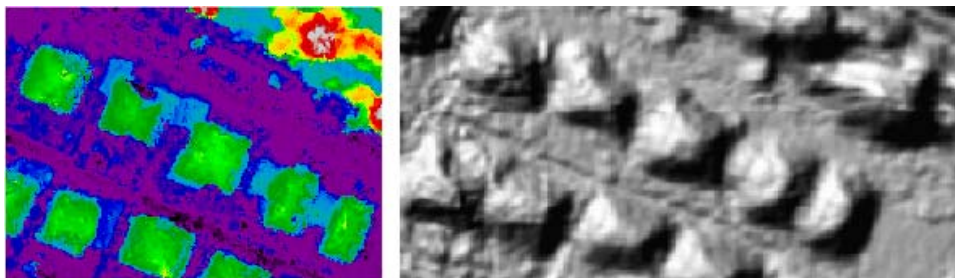




**Abbildung 5.6: Vergleich des Referenz DOM mit DOM der Ultracam-X (8cm GSD)**

Die Darstellungen der DOMs der 20cm GSD Bilder, zeigt ein größeres Rauschen in Form von Unebenheiten als bei den 8cm GSD Bildern.

Die Abbildung 5.7 zeigt die DOMs der DMC 20cm GSD. Das linke Bild stellt das mit Semi-global Matching erzeugte DOM mit 20cm Rasterweite dar. Das rechte Bild zeigt das schattierte DOM mit 60cm Rasterweite, erstellt mit Softwarepaket SAT-PP. Die Dachstrukturen sind im linken Bild deutlich zu erkennen. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich mit Semiglobal Matching deutlich mehr Punkte generieren lassen.



**Abbildung 5.7: Vergleich des DOMs der DMC 20cm GSD (linkes Bild: mit semiglobal Matching erzeugtes DOM mit 25cm Rasterweite, rechtes Bild: schattiertes DOM erstellt mit Softwarepaket SAT-PP mit 60cm Rasterweite (Graphik aus [15] entnommen))**

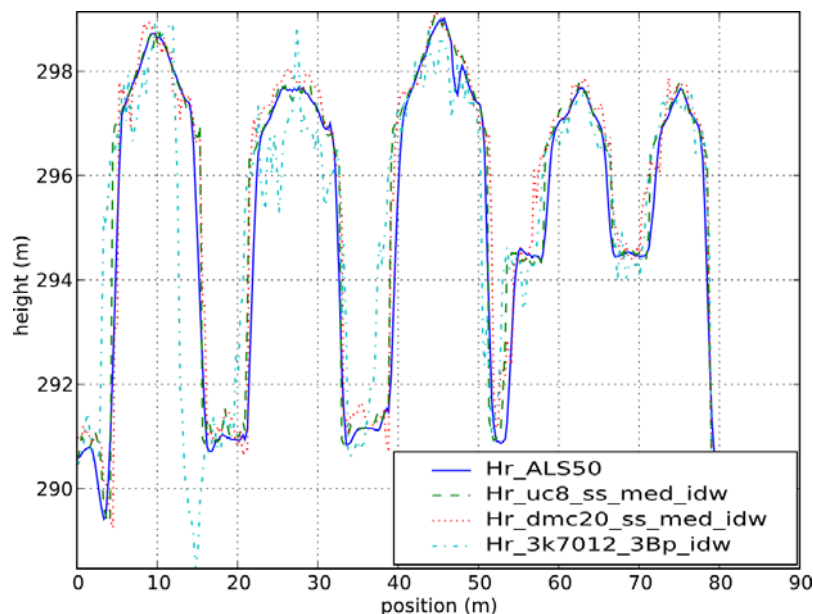
Um die generierte DOMs besser zu beurteilen, wird ein Vergleich der Profile durch die verschiedenen DOMs durchgeführt. Der Profilverlauf mit entsprechendem Bildausschnitt ist

in Abbildung 5.8 dargestellt. Das Profil ist ca. 80m lang und läuft durch ein Wohngebiet mit fünf kleineren Gebäuden mit einer Breite von 7m bis 12m.



**Abbildung 5.8:** Ein Ausschnitt aus einem Ultracam-X Bild (8cm GSD) zeigt für die Häuserreihe mit Profilverlauf

Die Profile der DOMs aus den Datensätzen ALS50, Ultracam-X 8cm GSD, DMC 20cm GSD und DLR 3K 20cm GSD sind in Abbildung 5.9 zusammen dargestellt. Der Vergleich der Profile zeigt, dass die DOMs aus allen drei Kamerasystemen eine deutliche Struktur des Gebäudes mit scharfen Kanten zeigen. Nur die DOMs aus DMC und 3K sind relativ stärker verrauscht. Das DOM der Ultracam-X nähert sich der Qualität der ALS 50 Daten an.



**Abbildung 5.9:** Profile der DOMs für den Bereich Häuserreihe aus Datensätzen ALS 50, Ultracam-X 8cm GSD, DMC 20cm GSD und DLR 3K 20cm GSD

### 5.3.3 Visuelle Evaluierung eines Sportplatzes

Auf ähnlicher Art und Weise wie im vorherigen Abschnitt wurde eine visuelle Evaluierung für das Testgebiet „Sportplatz“ mit relativ gleichbleibender Bildtextur durchgeführt, um das Rauschverhältnis der generierten DOMs genauer zu untersuchen. Die Abbildung 5.10 zeigt den Ausschnitt des Ultracam-X Bildes (8cm GSD) für den Sportplatz mit einem 105m langen Profilverlauf. Abbildung 5.11 stellt das DOM aus ALS50 Daten für den Bereich Sportplatz dar und zeigt die Höhe eines Punktes, der mit einem roten Kreuz im Bild dargestellt ist. Der Sportplatz wurde mit 16 UCX-Bildern, 11 DMC-Bildern und 2 3K-Bildern aufgenommen. Eine

Fusionierung der DOMs aus Bildpaaren in gleichen Streifen wurde für UCX und DMC Bilder durchgeführt. Dafür wurden 24 DOMs aus UCX-Bilder und 10 DOMs aus DMC-Bilder generiert.



Abbildung 5.10: Ausschnitt eines Ultracam-X Bild (8cm GSD) für das Testgebiet „Sportplatz“ mit Profilverlauf

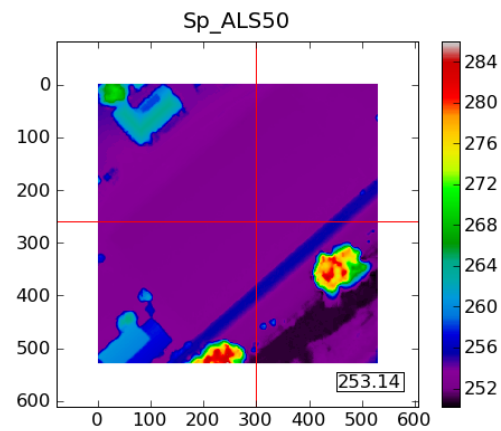


Abbildung 5.11: Referenz DOM aus ALS50 des Sportplatzes

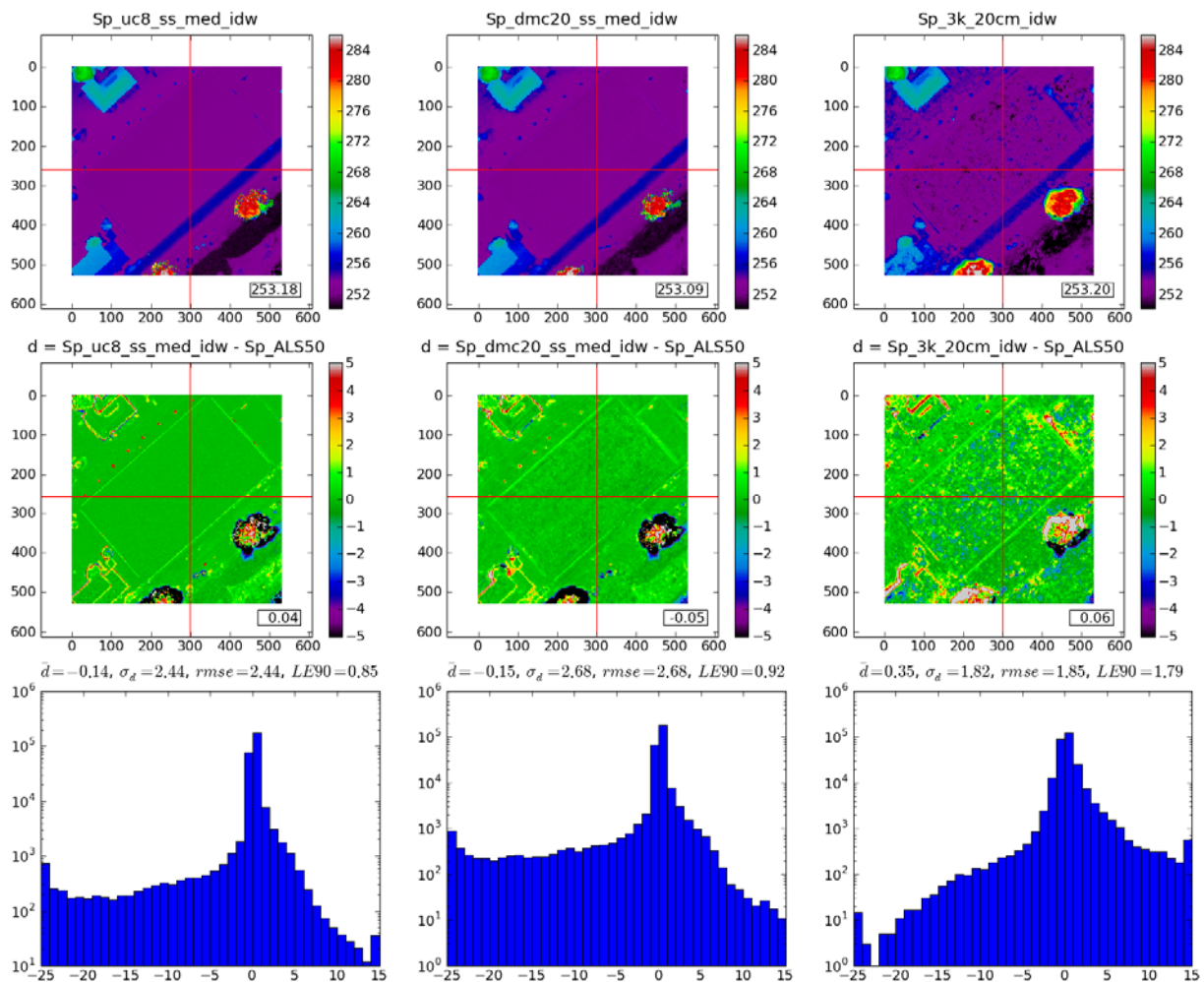
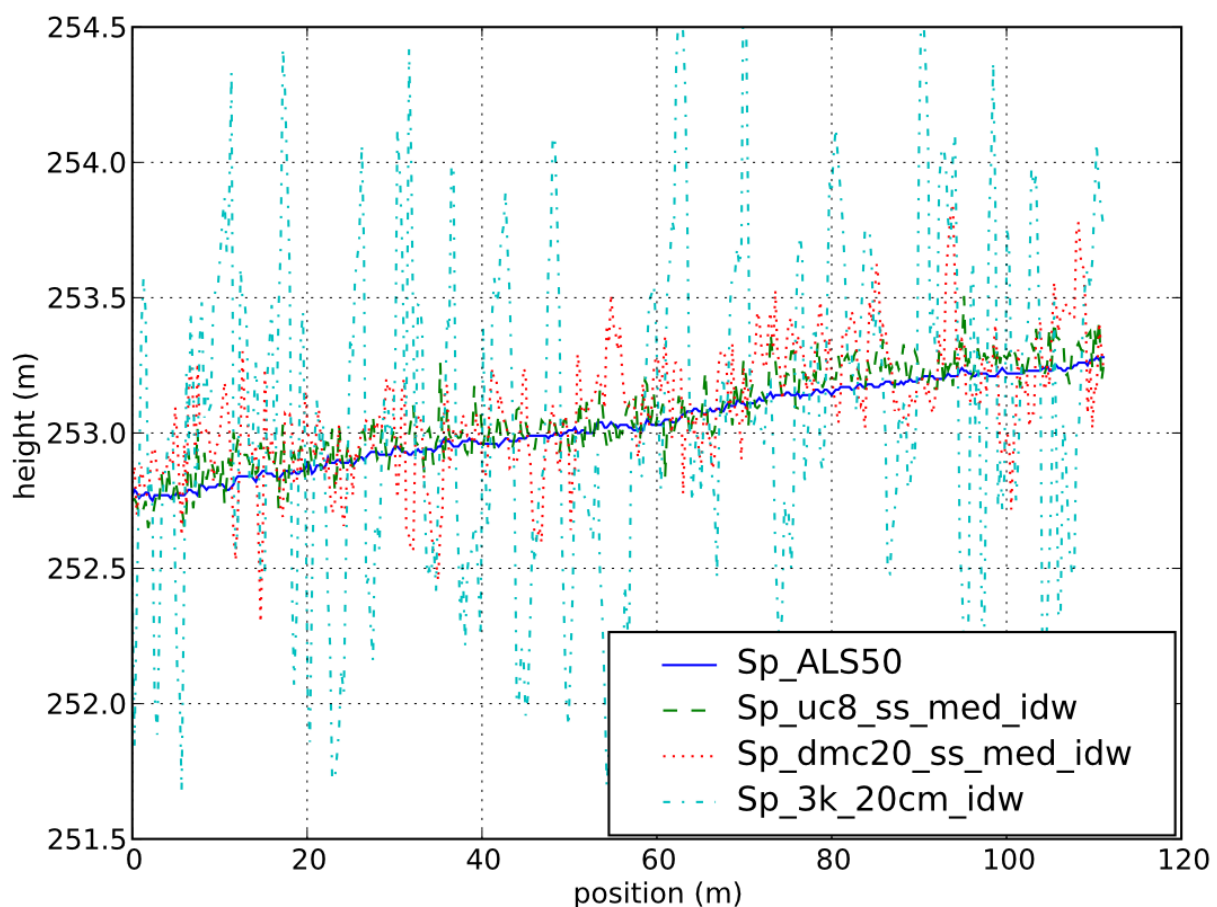


Abbildung 5.12: Visueller Vergleich der fusionierten und gefüllten DOMs des Sportplatzes. Reihenfolge von links nach rechts: Ultracam-X 8cm, DMC 20cm, 3K 20cm; von oben nach unten: DOM 25cm Rasterweite, Differenzbild zu Referenz DOM, Histogramm der Differenzen

Die Abbildung 5.12 zeigt die gefüllten DOMs der Ultracam-X 8cm GSD, DMC 20cm GSD und DLR 3K 20cm GSD für den Sportplatz. Im Vergleich zum Referenz DOM kann man mehr Details in den DOMs aus photogrammetrischen Verfahren erkennen. Zum Beispiel sind die Lampen und Bäume deutlich zu erkennen, während im Referenz DOM hier gar nichts zu sehen ist. Für die Differenzbilder in der zweiten Zeile der Abbildung 5.12 ist eine Farbskala für den Bereich von -5m bis 5m definiert. Ein Großteil der Flächen in den Differenzbildern sind mit grüner Farbe dargestellt. Das bedeutet, dass die meisten Differenzen kleiner als  $\pm 1\text{m}$  sind. Die meisten Fehler liegen im Bereich der Bäume und der Kanten der Gebäude. Bei den statistischen Werten ist insbesondere der Vergleich der Werte  $\sigma_d$  und LE90 von Interesse. Der LE90 beträgt für die Ultracam-X 0.85m und ist noch kleiner als die Standardabweichung mit einem Wert von 2.44m. Das bedeutet, dass nach Eliminierung der äußeren Bereiche des Sportplatzes die Differenzen zwischen den generierten DOMs und dem Referenz DOM noch geringer sein sollten. Dies kann man auch in der Profilvergleich in der Abbildung 5.13 erkennen. Der Profilverlauf ist schon in Abbildung 5.13 bezeichnet.



**Abbildung 5.13: Profile der DOMs für den Bereich Sportplatz aus Datensätzen ALS 50, Ultracam-X 8cm GSD, DMC 20cm GSD und DLR 3K 20cm GSD**

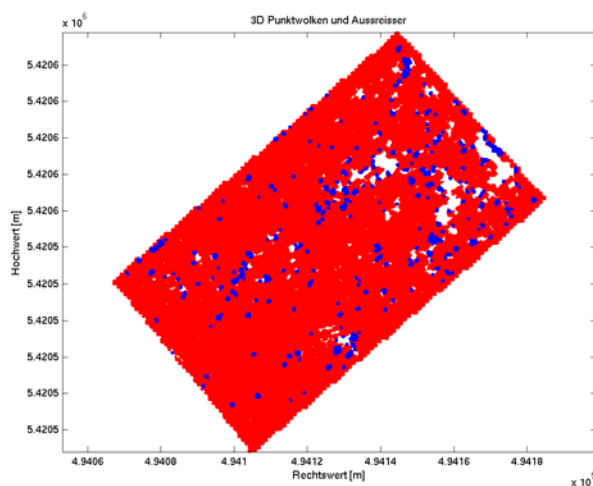
In dieser Abbildung kann man erkennen, dass die Differenzen der DOMs aus DMC und DLR 3K im Vergleich zum Referenz DOM kleiner als ein Meter sind. Das DOM aus Ultracam-X 8cm GSD enthält im Vergleich zu den anderen beiden Kamerasystemen mit 20cm GSD deutlich geringeres Rauschen.



### 5.3.4 Genauigkeitsuntersuchungen in ebenem Gelände

Um die erreichte Genauigkeit der DOMs der verschiedenen Luftkamerasystemen zu analysieren, wird das gleiche Untersuchungsprinzip wie in [15] beschrieben verwendet. Statt dem Programm MATCH-T werden die in dieser Diplomarbeit entwickelten DOM-Generierungsprogramme benutzt, um die 3D Punktwolken des Testgebietes zu berechnen. Anhand dieser Ergebnisse werden dann die 3D Punktwolken im Bereich eines ebenen Sportplatzes mit Hilfe des C-Programms „polygontest\_sportplatz.c“ selektiert. Die Umrisse des Sportplatzes werden mit einem Polygonzug definiert. Die Koordinaten wurden aus einer \*.kmz Datei entnommen, die das Auswerteteam Höhenmodelle für die Definition der Untersuchungsbereiche bereitstellt.

Aus der jeweils verfügbaren 3D Punktwolke wird anschließend eine ausgleichende Ebene berechnet, um danach aus dem senkrechten Abstand die Standardabweichung der Punkte zu bestimmen. Wegen Schlagschatten von Bäumen, Flutlichtmasten oder Ähnlichem gibt es Ausreißer in den jeweils erzeugten 3D Punktwolken. Zudem unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte und Aufnahmekonfigurationen Größe und Lage der Schatten in den verschiedenen Flügen. Dies erschwert eine vergleichende Bewertung des Ergebnisses. Um diesen Effekt zu minimieren, wurden nach der ersten Berechnung der ausgleichenden Ebene jeweils die 3D Punkte eliminiert, die einen größeren senkrechten Abstand zur Ebene aufweisen als  $3\sigma_0$ . Die restlichen 3D Punkte werden noch einmal zur Berechnung einer neuen ausgleichenden Ebene verwendet. Als Beispiel wird in der Abbildung 5.14 20cm GSD Datensatz der DMC-Befliegung dargestellt. Für alle Punkte ergibt sich ein  $\sigma_0$  von 55.35cm. 1.43% dieser Punkte weisen einen Abstand größer als  $\pm 166.05\text{cm}$  ( $3\sigma_0$ ) zur ausgleichenden Ebene auf. Die vorher eliminierten Punkte sind in Abbildung 5.14 blau markiert. Im Vergleich dazu sind die verbleibenden Punkte rot markiert. In den weißen Flächen wurde kein 3D Punkte berechnet.

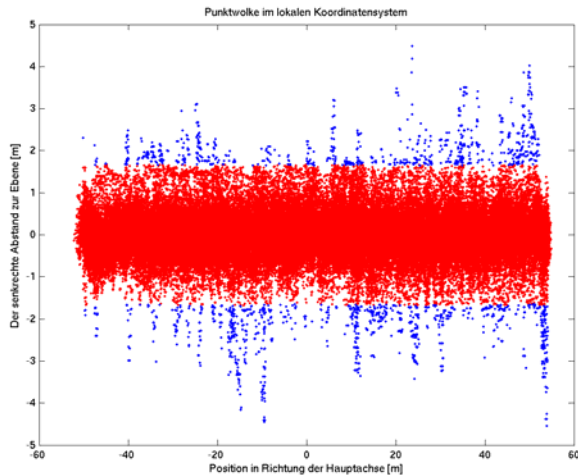


**Abbildung 5.14: 3D Punkte aus DMC-Bild 20cm GSD**

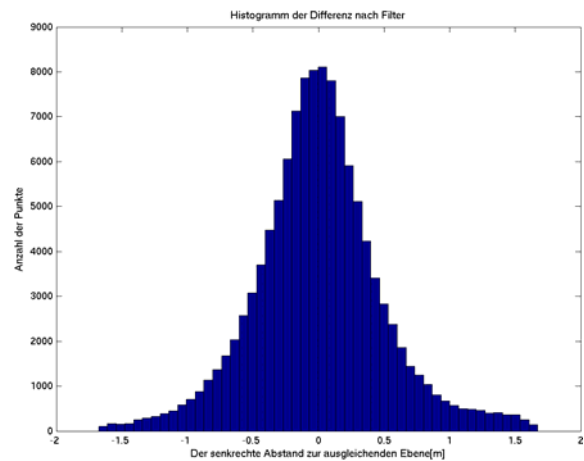


**Abbildung 5.15: Verwendetes DMC-Bild im Bereich des Sportplatzes**

In Abbildung 5.15 sind die 3D Punkte in einem lokalen, durch die ausgleichende Ebene definierten System dargestellt. Dabei wurde die x-Achse des Diagramms durch den jeweiligen horizontalen Abstand zum Schwerpunkt in Richtung der Hauptachse und die y-Achse durch den senkrechten Punktabstand definiert. Die Abbildung 5.17 stellt das Histogramm vom senkrechten Abstand zur ausgleichenden Ebene dar.



**Abbildung 5.16: Punkte im lokalen Koordinatensystem**



**Abbildung 5.17: Histogramm des Abstands zur ausgleichenden Ebene**

Die Ergebnisse der durchgeführten Genauigkeitsuntersuchungen für die verschiedenen Punktwolken sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Dabei wurden die Datensätze DMC 20cm GSD, Ultracam-X 8cm GSD und DLR 3K 20cm GSD berücksichtigt. Die erste Zeile enthält die durchschnittliche Anzahl von Punkten pro  $m^2$  im Bereich des untersuchten Sportplatzes. Die Fläche der Sportplatz beträgt  $6430.5m^2$ . Die dritte Zeile repräsentiert die Standardabweichung der Ebeneausgleichung. Die vierte Zeile enthält den prozentualen Anteil der Punkte, deren Abstand zur der ausgleichende Ebene größer als  $3\sigma_0$  ist. Die fünfte Zeile beinhaltet die Standardabweichung der Ebeneausgleichung für die verbleibenden Punkte. Die in der zweiten Zeile angegebene mittlere Höhe wurde aus den gefilterten Punkten berechnet. Die Ergebnisse für MATCH-T wurden aus [15] entnommen. Im Vergleich dazu werden die gleichen Parameter mit den Ergebnissen des in dieser Diplomarbeit entwickelten Programms berechnet.

Die Tabelle 5.1 zeigt, dass die Dichte der Punktwolke beim SGM ca. sechsfach dichter als beim MATCH-T ist, aber eine ca. zweifach größere Standardabweichung aufweist. Die Ergebnisse sind jedoch nicht direkt vergleichbar, da in MATCH-T viele Bildkombinationen verwendet wurden, während hier nur ein Bildpaar verwendet wurde.

Um die Ergebnisse des 3K Kamerasystems zu vergleichen, werden außer den genannten fünf Elementen noch die Parameter der ausgleichenden Ebene aus den verbleibenden Punkten berechnet. Die ausgleichende Ebene wird mit Gleichung  $ax+by+cz+d=0$  dargestellt. Der Neigungswinkel der Ebene zur horizontalen Ebene wird aus  $\alpha = \arccos(c)$  berechnet.

Da die Normale der ausgleichenden Ebene der Vektor  $\begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix}^T$  mit  $\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = 1$  ist, ist

die Normale der horizontalen Eben  $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$ . Es gilt: 
$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left\| \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \right\| \cdot \left\| \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\| \cdot \cos \alpha .$$

Deswegen ergibt sich als Formel für den Neigungswinkel  $c = \cos \alpha$ . Der Azimut der Neigungsrichtung wird aus  $\arctan(a/b)$  berechnet. Die unterschiedlichen Ergebnisse für die Ebenen sind darauf zurückzuführen, dass die äußere Orientierung des 3K Kamerasystems unterschiedlich genau berechnet wurden und aufgrund der direkten Georeferenzierung auch ungenauer sind. Die Ergebnisse des DLR 3K Kamerasystems ist daher deutlich verschiedenen zu den zwei anderen Kamerasystemen.

		Ultracam-X - 8cm	DMC - 20cm	DLR 3K - 20cm
MATCH-T  (aus [15] entnommen)	Punktdichte [Pkte/m <sup>2</sup> ]	19.04	2.71	-
	$Z_{mittl.}$ [m]	253.067	252.896	-
	$\sigma_0$ vor Filter [cm]	8.04	25.36	-
	Gefiltert [%]	0.49	1.10	-
	$\sigma_0$ nach Filter [cm]	6.84	17.23	-
In dieser Diplomarbeit entwickelte Programme	Punktdichte [Pkte/m <sup>2</sup> ]	122.33	18.12	28.01
	$Z_{mittl.}$ [m]	253.129	253.155	253.121
	$\sigma_0$ vor Filter [cm]	18.11	55.35	74.86
	Gefiltert [%]	0.95	1.43	0.77
	$\sigma_0$ nach Filter [cm]	15.09	48.85	71.42
Ausgleichende Ebene ( $ax+by+cz+d=0$ )	a	-0.007762	-0.004149	-0.004611
	b	0.008131	0.004494	0.000462
	c	0.999937	0.999981	0.999989
	d	-40492.530	-22560.297	-480.968466
	Neigung [°]	0.644064	0.350443	0.265524
	Azimet [°]	-43.668246	-42.719929	-84.273872

Tabelle 5.1: Genauigkeitsuntersuchungen für die abgeleiteten 3D Punktwolken

Die in Tabelle 5.1 gezeigten Ergebnisse sind aus einem Bildpaar abgeleitet. In Tabelle 5.2 werden die Ergebnisse nach Fusionierung der DOMEs gezeigt. Wie bei der Häuserreihe wird für mögliche Bildpaare ein DOM aus den entsprechenden Punktwolken generiert. Die Rasterweite beträgt 8cm für UCX-Bilder und 20cm für DMC-Bilder. Die DOM werden dann nach dem Verfahren „Median“ fusioniert. Aus den fusionierten DOM wird dann neue Punktwolke generiert. Das heißt, die originären Punktwolken werden durch diesen Prozess reduziert. Diese Punktwolke wird dann wie vorher mit dem Ausgleichungsverfahren analysiert. Die Tabelle 5.2 zeigt entsprechende Ergebnisse.

Kamera	Ultracam-X - 8cm GSD		DMC - 20cm GSD	
Bilder	4 Flugstreifen, 16 Bilder		4 Flugstreifen, 11 Bilder	
Bildkombination	Gleiche Streifen	Alle Bildkombinationen	Gleiche Streifen	Alle Bildkombinationen
Verwendete Bildpaare	24	120	10	55
Punktdichte [Pkte/m <sup>2</sup> ]	152.52	152.33	15.54	15.45
$Z_{mittl.}$ [m]	253.060	253.072	253.124	253.077
$\sigma_0$ vor Filter [cm]	11.43	9.32	22.63	17.06
Gefiltert [%]	0.99	1.11	1.48	2.04
$\sigma_0$ nach Filter [cm]	7.06	3.87	19.22	11.79

Tabelle 5.2: Genauigkeitsuntersuchungen für die fusionierten 3D Punktwolken

Die Genauigkeit der Punktwolke nach der Fusionierung ist viel besser als die aus einem Bildpaar abgeleitete Punktwolke. Die Standardabweichung der Punktwolke aus Bildpaaren der gleichen Streifen ist etwas höher als die der Ergebnisse aus MATCH-T, Es wurde jedoch eine wesentlich höhere Punktdichte erreicht. Die Ergebnisse der Fusionierung aller Bildkombinationen zeigen eine deutliche Verbesserung der Standardabweichung, sind jedoch in der Praxis wegen des stark erhöhten Rechenaufwandes nicht für die Auswertung größerer Gebiete geeignet.

## 6 Anwendungsbeispiel: Erdrutschgebiet in Nachterstedt

### 6.1 Tatsache

Am 18. Juli 2009 etwa um 5:40 Uhr ereignete sich ein heftiger Erdrutsch in Nachterstedt in Sachsen-Anhalt. Ein zweistöckiges Haus, Teile eines Mehrfamilienhauses sowie ein Straßenabschnitt wurden in einem See der früheren Braunkohleregion mitgerissen. Drei Bewohner eines Doppelhauses kamen ums Leben. Dieses ehemalige Bergbauggebiet bleibt rutschgefährdet. Die Abbildung 6.1 zeigt den Stand nach dem Erdrutsch.



Abbildung 6.1: Erdrusch in Nachterstedt (Graphik aus [17] entnommen )

### 6.2 Befliegung

Am 22. Juli 2009 hat eine Forschungsflugzeug (siehe Abbildung 6.2) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) das von dem Erdrutsch betroffene Gebiet in Nachterstedt überflogen und im Rahmen des ARGOS-Projektes (Airborne Wide Area High Altitude Monitoring System) hochgenaue Luftbilder mit dem 3K Kamera System erstellt.





**Abbildung 6.2: Das Forschungsflugzeug Cessna Caravan (Graphik aus [18] entnommen)**

Folgendes sind die Flugdaten

- Flughöhe über Boden: ca. 1000m
- Fluggeschwindigkeit: 70 m/s
- Zeitabstand zwischen den Aufnahmen: 1.2 s
- Basislänge zw. Nachbarbildern: 84m
- Überlappung in Flugrichtung: 80%
- Bodenauflösung: 14cm
- Befliegung: 2 Streifen senkrecht zu einander
- Aufnahmemodus: Links-, Nadir-, und Rechtsblick Kamera
- Theoretische Genauigkeit eines abgeleiteten DOM in der Höhe: 0.7m

Wegen der knappen Zeit innerhalb des Projekts gibt ein Problem: Die Boresightwinkel und Kalibrierungsparametern des 3K Kamera Systems sind nicht ganz aktuell (Aug.2008). Diese konnten nicht so schnell und kurzzeitig neu bestimmt werden. Deswegen wurden einfach die alten Daten für die Generierung des DOMs verwendet.

## 6.3 Generierung digitaler Oberflächenmodelle:

### 6.3.1 3K-Bilder im Erdrutschgebiet

Die Eigenschaften der 3K-Bilder sind gleich wie die Daten im Testgebiet München. Für die DOM-Generierung sind hier nur die Nadir-Bilder verwendet worden, weil sie eine bessere Genauigkeit als die Seitblick-Bilder haben. Abbildung 6.3 zeigt ein Beispiel eines Original 3K-Bildes.



Abbildung 6.3: Ein Original 3K-Bild im Erdrutschgebiet

### 6.3.2 DOM nach Fusion aus mehreren Bildern

Die DOM-Generierungsprogramme sind die gleichen wie für die Bilder in München. Zur Prozessierung werden meistens direkt benachbarte Bildpaare als Eingabe verwendet. Nachdem verschiedene digitale Oberflächenmodelle aus mehreren Bildpaaren generiert wurden, wurden alle 3D-Punkte zusammengefügt und daraus ein gesamtes DOM des Erdrutschgebiets generiert. Das generierte DOM hat eine Auflösung von einem Meter. Man kann darin schon die Häuser und Bäume im Wald erkennen. Es gibt auch manche Punkte im Concordia-See, die im DOM sichtbar sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es noch kleine Strukturen wie zum Beispiel eine Wasserwelle oder sichtbaren Seegrund gibt. Solche Punkte wurden für die nachfolgenden Untersuchungen aber eliminiert. Der ganze DOM-Generierungsprozess wurde automatisch durchgeführt. Trotz der großen Datenmenge wurde schon am 24.07.2009, also zwei Tage nach Überflug, das digitale Oberflächenmodell (siehe Abbildung 6.4) des Erdrutschgebiets fertiggestellt.

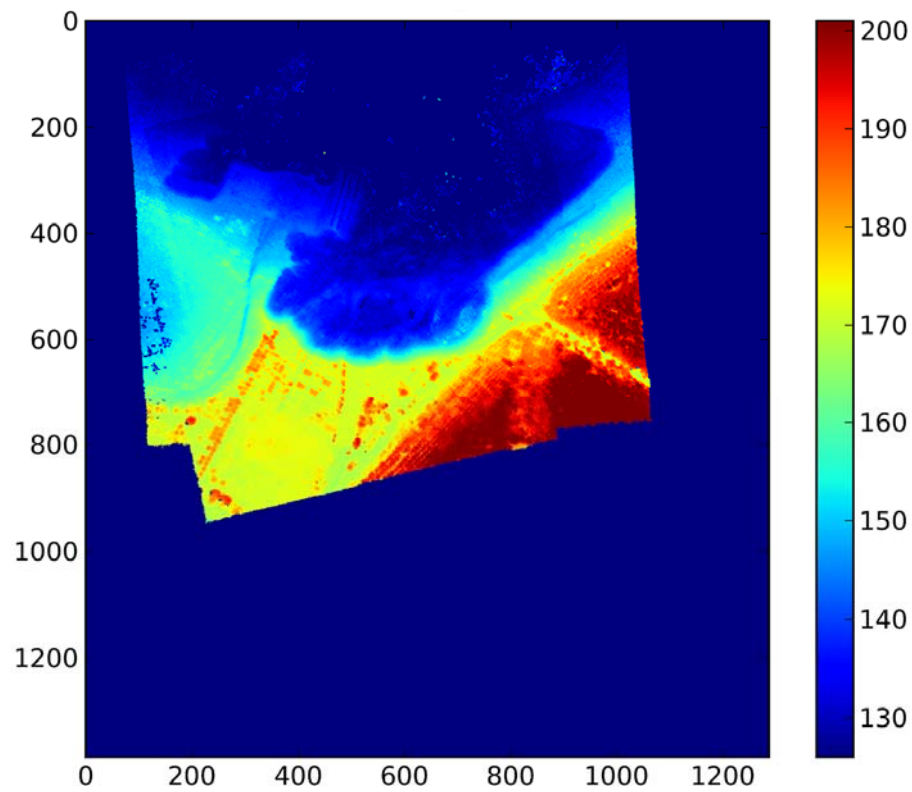


Abbildung 6.4: Digitales Oberflächenmodell für Erdrutschgebiet

### 6.3.3 Orthophoto aus 3K Bilder



Abbildung 6.5: Orthophoto für Erdrutschgebiet



Wie im Abschnitt 6.3.2 erläutert, liegen die meisten Ausreißer im Wasserbereich. Um die Ausreißer in dem generierten DOM zu eliminieren, ist ein Orthophoto im gleichen Format und Auflösung notwendig. Das Orthophoto wird mit einer Orthoprojektion unter Verwendung der inneren und äußeren Orientierungen der 3K-Bilder sowie einem DOM abgeleitet aus SRTM Daten generiert. Das ungenaue DOM führt zwar zu Fehlern im Orthophoto, aber für die Nadirbilder ist der Einfluss nicht so groß. Zur Identifizierung der Wasserfläche ist es damit schon ausreichend.

#### 6.3.4 Auswahl der Wasserflächen und Detektion von Ausreißern in generierten DOM

Weil es keine oder nur wenig Textur auf der Wasserfläche gibt, gibt es Probleme beim Semiglobal Matching. Dies kann man auch an den vielen Ausreißern auf der Wasserfläche erkennen. Deshalb wurde manuell aus dem Orthophoto die Wasserfläche detektiert und in die entsprechende Stelle im DOM ein Hintergrundwert eingesetzt. Das so geänderte DOM sieht man in Abbildung 6.6. Man kann klar erkennen, dass alle Wasserflächen oben in Abbildung auf dem Wert des Hintergrundes gesetzt worden sind.

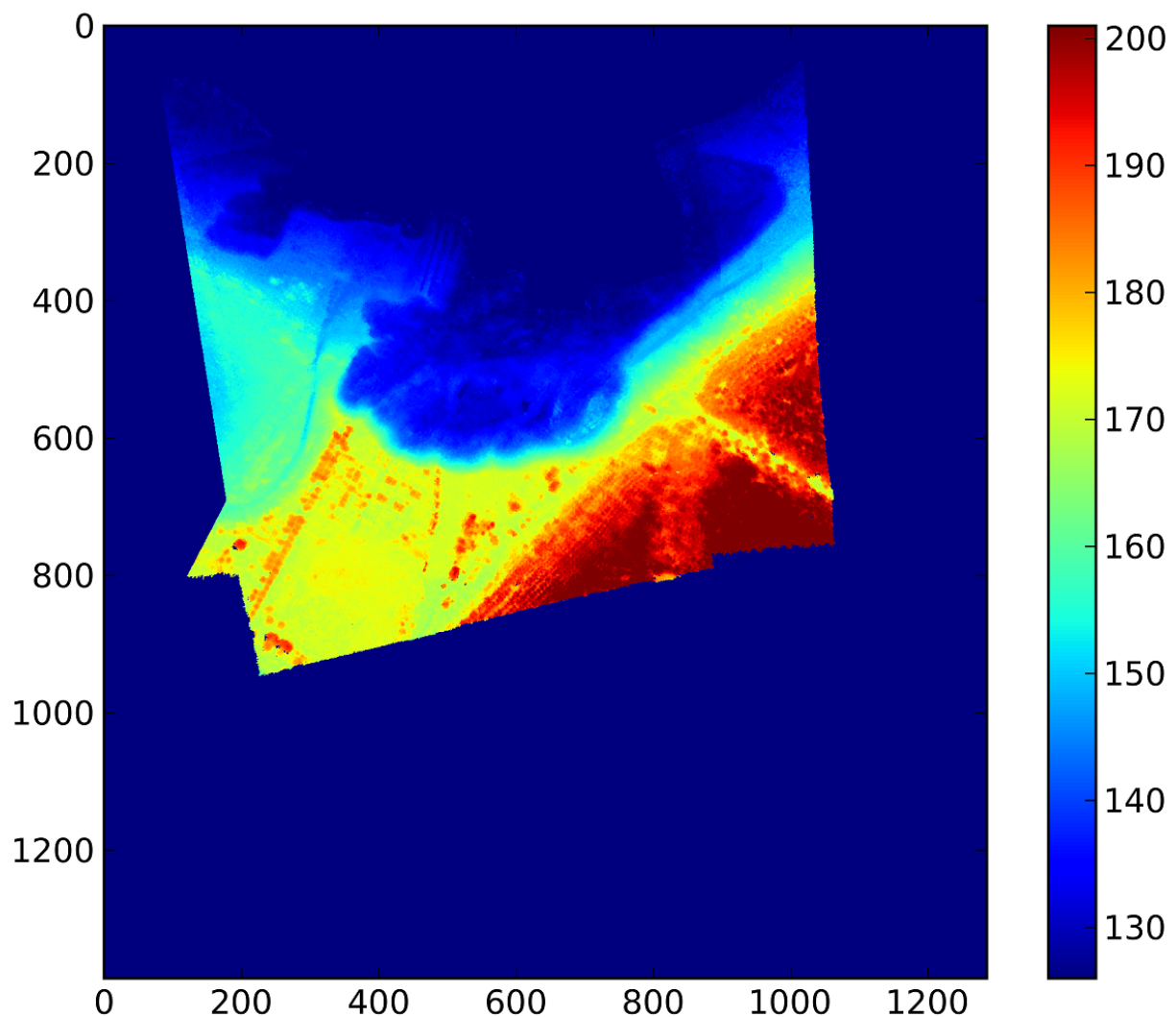


Abbildung 6.6: DOM ohne Wasserbereich

### 6.3.5 3D Darstellung des DOMs

Das generierte digitale Oberflächenmodell mit Orthophoto zusammen ist in Abbildung 6.7 als Perspektivansicht dargestellt.

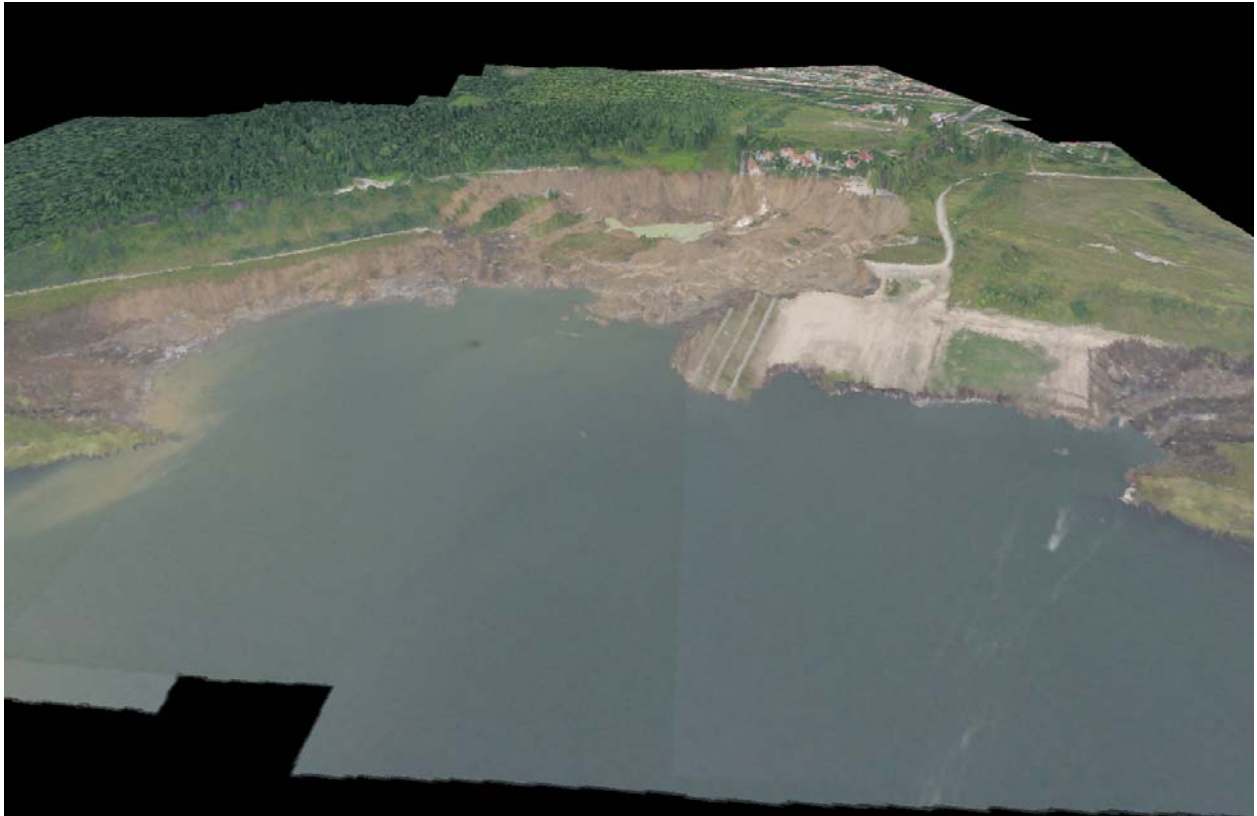


Abbildung 6.7: Perspektive Ansicht des DOMs mit Orthophoto

## 6.4 Vorheriges DOM aus SRTM Daten

Um die Veränderungen des Erdrutschgebietes zu erkennen, ist ein vorheriges DOM notwendig. Als Vergleichs-DOM wurde ein Ausschnitt eines DOMs abgeleitet aus SRTM Daten verwendet. SRTM-Daten sind Fernerkundungsdaten der Erdoberfläche, die bei der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) im Februar 2000 aus dem Weltraum aufgezeichnet wurden. Genaue Beschreibung von SRTM Daten sind in [19] genauer beschrieben. Die hier verwendeten SRTM-Daten haben eine Rasterweite von 25m. Dieses Modell wurde zunächst bilinear interpoliert und auf eine Auflösung von 1m im gleichen Gebiet resampelt.

Die Abbildung 6.8 zeigt das digitale Oberflächenmodell aus SRTM und die Abbildung 6.9 zeigt das entsprechende Luftbild vor der Katastrophe.

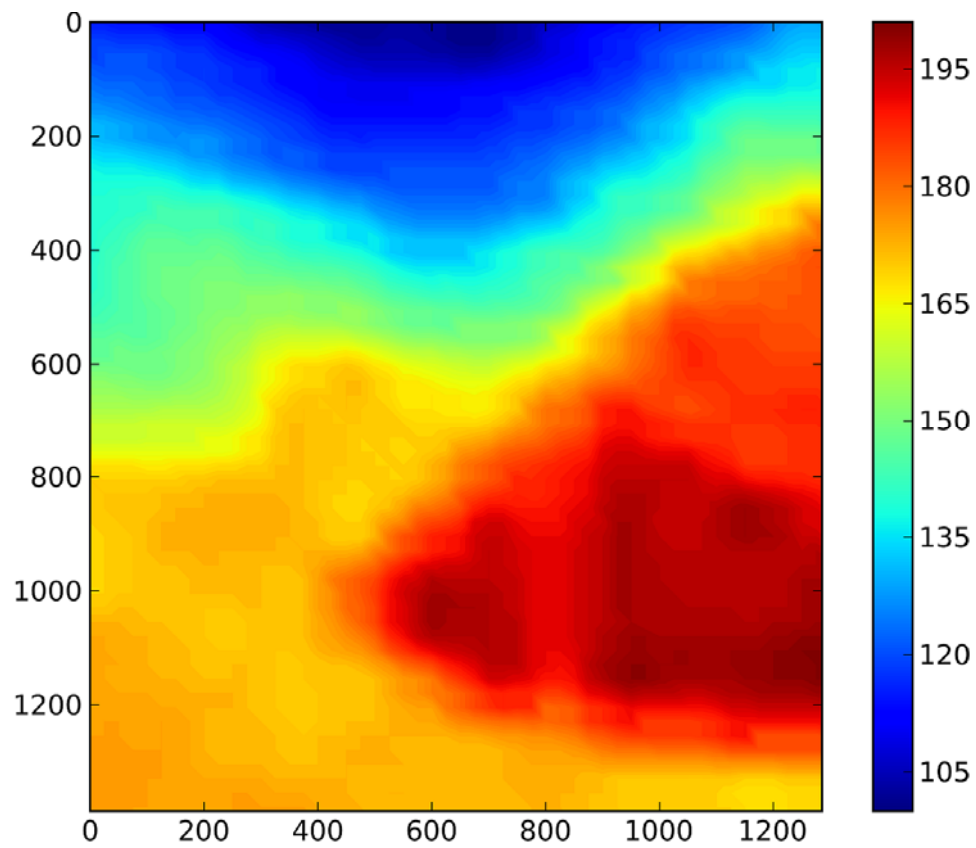


Abbildung 6.8: Digitales Oberflächenmodell aus SRTM für Erdrutschgebiet



Abbildung 6.9: Bildausschnitt aus Google Earth von Erdrutschgebiet (Aufgenommen im Jahr 2000, ausgeschnitten mit UTM Koordinaten 660875 E, 5742630 N; 662161 E, 5741243 N)

Leider ist das DOM nicht mehr aktuell und stimmt deshalb nicht mehr exakt mit der Realität überein. Die Hauptunterschiede liegen in dem Bereich, wo heute der See liegt, weil der Seespiegel angestiegen ist. Deswegen wurde das aus SRTM abgeleitete DOM „künstlich“ überflutet. Der Wasserstand des Concordia Sees betrug am 30.04.2009 81.60m über Normalnull. (aus Internetseite [20]). Die lokale Geoidundulation beträgt 44.69m. Der Wasserspiegel des Concordia Sees betrug deswegen am 30.04.2009 126.29m über dem Ellipsoid. Im DOM werden dann allen Pixel mit niedrigerem Höhenwert als 126.29m ein Wert von 126.29m zugewiesen. Das so visuell überflutete DOM aus SRTM ist in Abbildung 6.10 dargestellt.

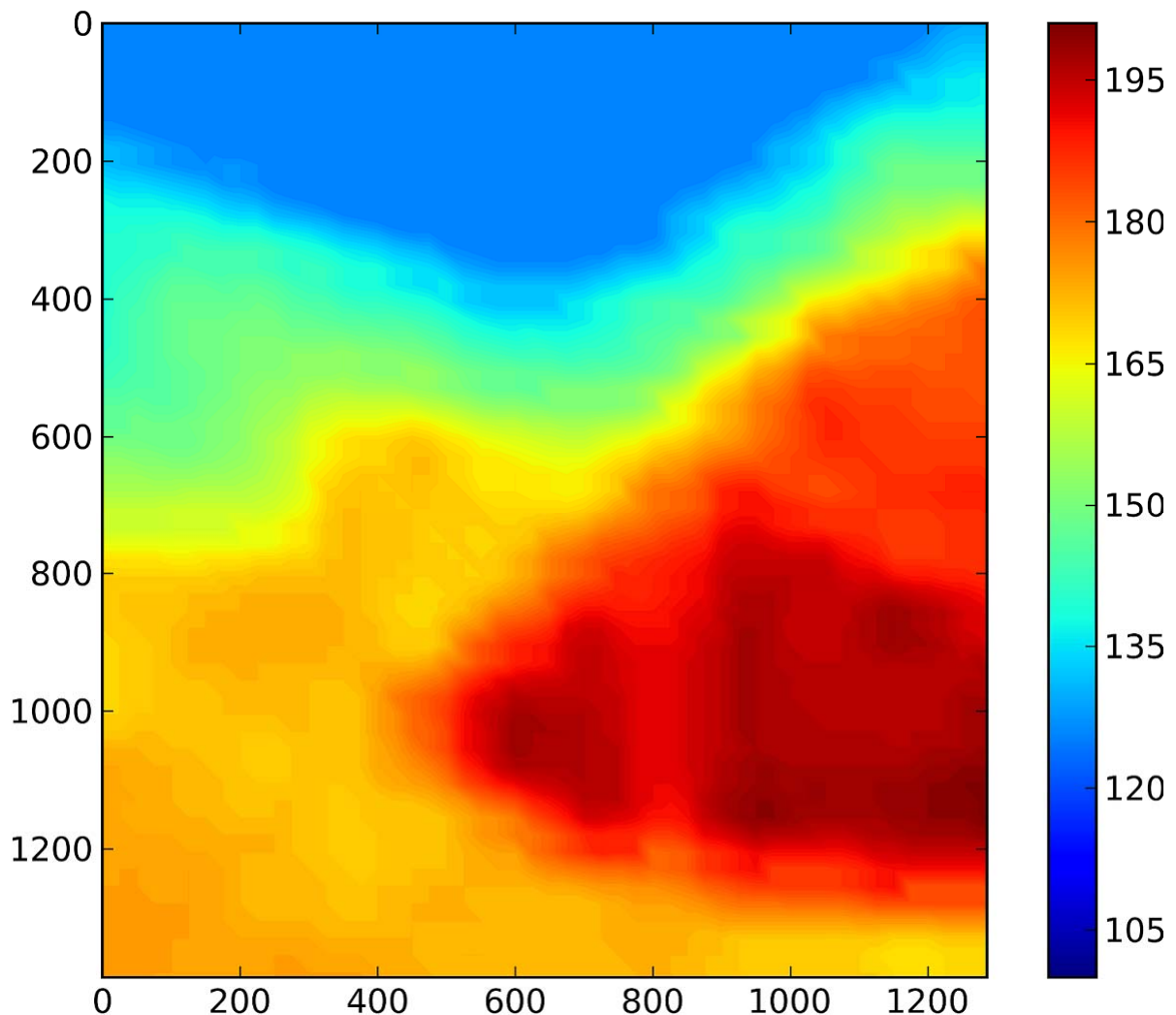


Abbildung 6.10: visuell überflutete DOM aus SRTM

## 6.5 Vergleich von beiden DOM

### 6.5.1 Zusammenstellen

In Abbildung 6.11 wird eine Gegenüberstellung der beiden DOMs gezeigt. Beide sind mit der gleichen Farbskala für gleiches Gebiet dargestellt.



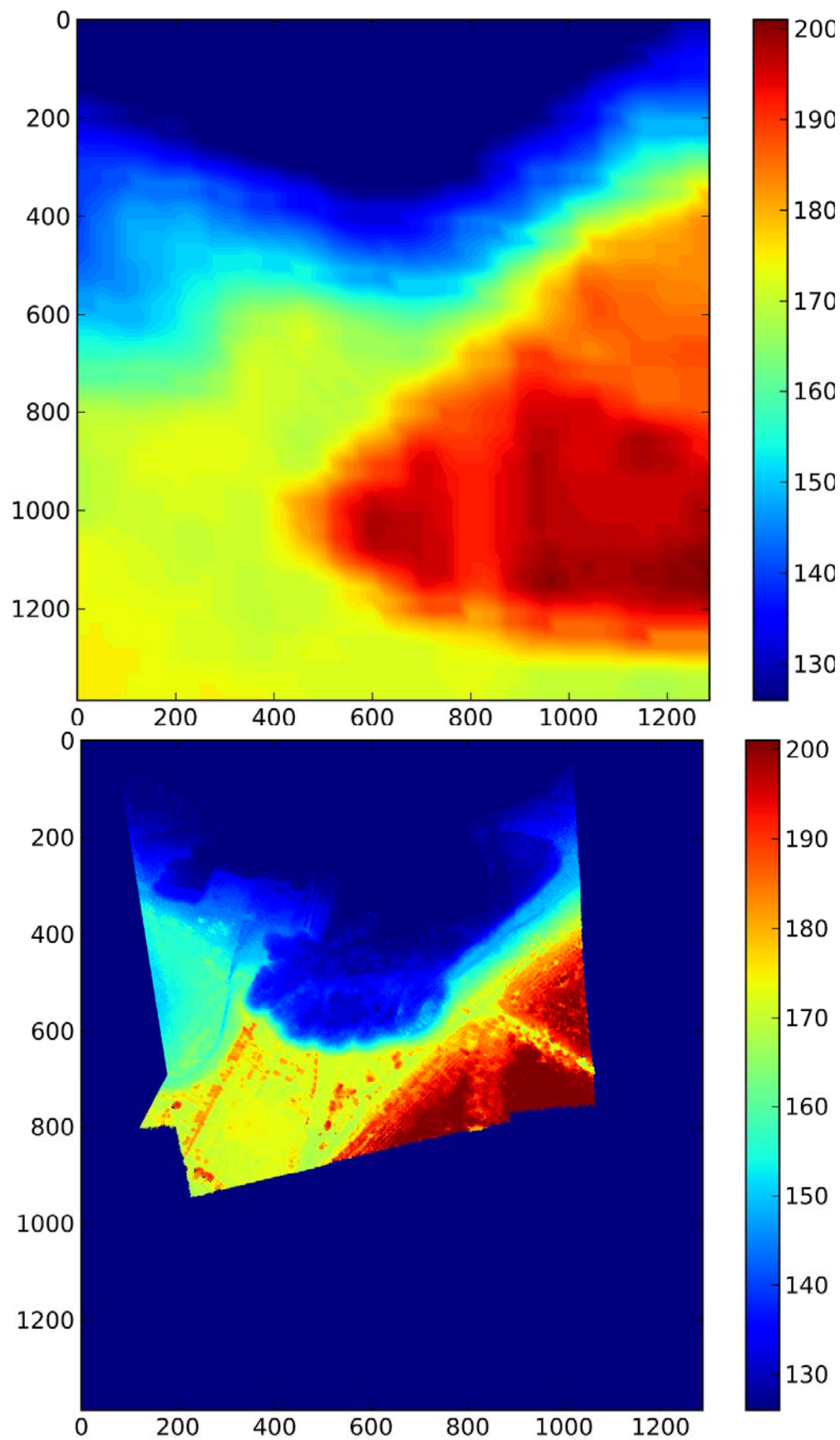


Abbildung 6.11: Zusammenstellung der beiden DOM (oben: vor dem Erdrutsch, unten: nach dem Erdrutsch)

### 6.5.2 Vergleich des 3K DOMs mit dem Referenz DOM

Die wichtigste Frage für den Vergleich der beiden DOMs ist, wie gut die beiden DOMs zu einander passen. Um diese Frage zu beantworten, wird ein relativ ebenes Gebiet aus dem Orthophoto manuell markiert. Innerhalb dieses Gebietes sollte kein Erdrutsch vorhanden sein. Das gewählte Gebiet ist ein Sportplatz mit freiem Grasgebiet mit deutlichem Abstand zur Abbruchkante. Die Abbildung 6.12 zeigt das markierte Grasgebiet auf dem Orthophoto.



Abbildung 6.12: Orthophoto mit markierten Grasgebiet

Innerhalb des markierten Gebiets werden Differenzen von generierten 3K DOM zum Referenz DOM (SRTM) berechnet. Die Differenzen sind als Histogramm in Abbildung 6.13 dargestellt. Die Differenzen liegen zwischen -2m bis 4m. Die mittlere Differenz beträgt 0.8m. Die Standardabweichung der Differenzen beträgt 1.53m. Wegen der geringen Auflösung von SRTM und der unterschiedlichen abgebildeten Oberflächen (nur Geländemodell bei SRTM, Grasoberfläche bei 3K) sind diese 0.8m Unterschied noch akzeptierbar und als insgesamt niedrig anzusehen.



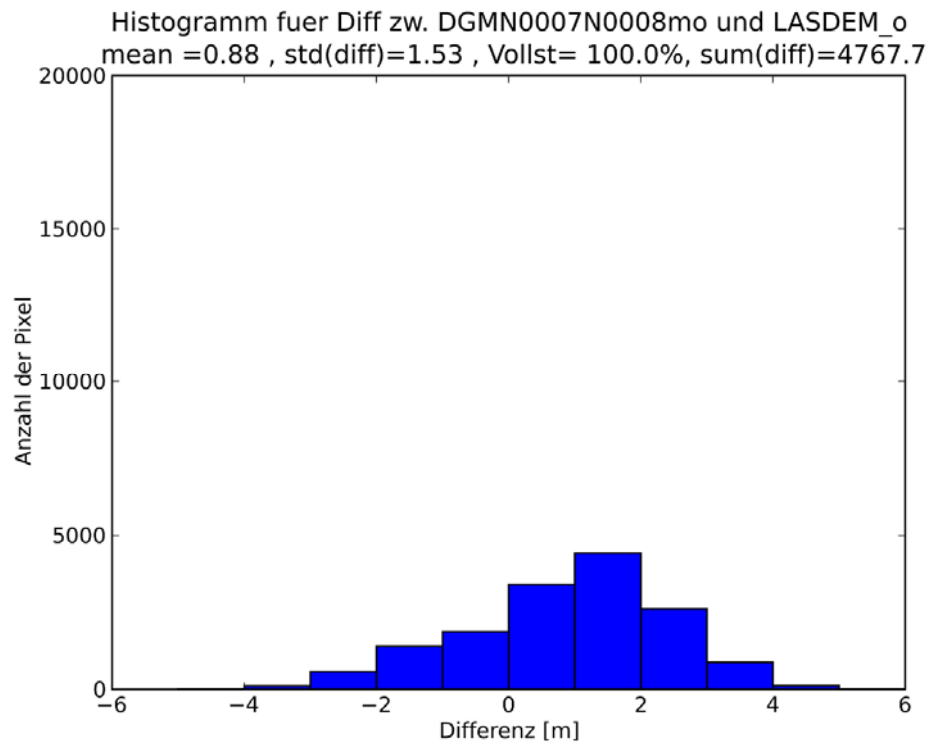


Abbildung 6.13: Histogramm von den Differenzen der beiden DOM im Grasgebiet

### 6.5.3 Bildvergleich 2006 gegenüber 2009 in Erdrutschgebiet



Abbildung 6.14: Luftbild-Vergleichskarte Nachterstedt, vorher und nachher (Graphik aus [21] entnommen)

Das linke Bild der Abbildung 6.14 zeigt Nachterstedt in einer Aufnahme vom 05.05.2006. Die rechte Aufnahme stammt vom 22.07.2009, vier Tage nach dem Erdrutsch vom 18. Juli. Die rote Linie in beiden Bildern zeigt ungefähr den Verlauf der Bruchkante am 22. Juni 2009.

#### 6.5.4 Differenzbild

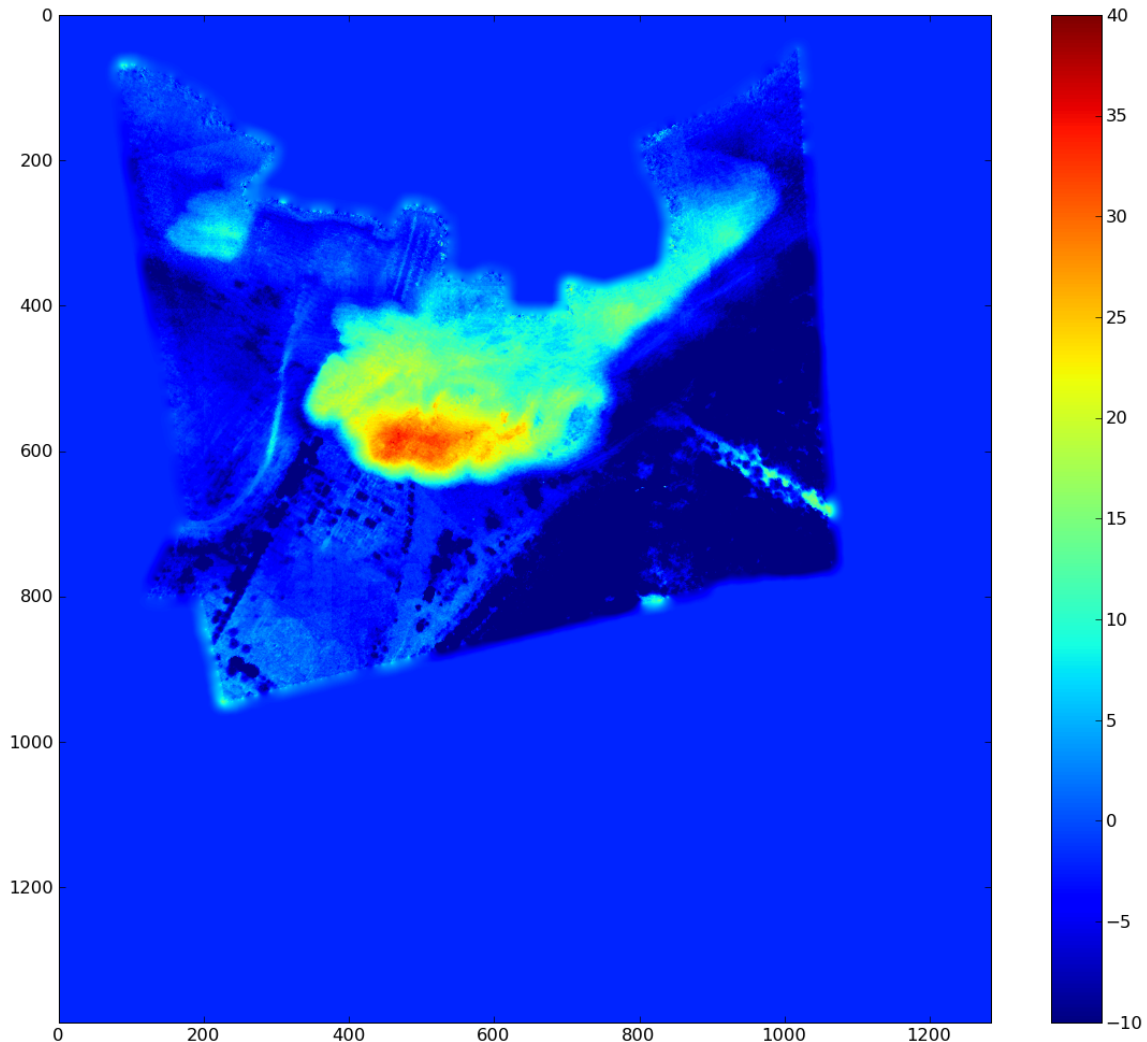


Abbildung 6.15: Differenzbild, DOM aus SRTM - DOM aus 3K

Um die Änderung des Erdrutschgebiets besser zu erkennen, wird ein Differenzbild durch Subtraktion des visuell gefluteten DOMs aus SRTM von dem generierten DOM aus 3K-Daten generiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.15 zu sehen. Man kann erkennen, dass die maximale Höhendifferenz 40 Meter beträgt. Die Häuser und Bäume im Wald werden mit negativen Werten dargestellt, da diese im SRTM DOM nicht oder nur teilweise vorhanden sind.

#### 6.5.5 Volumen des gerutschten Materials

Um die Ursachen des Erdrutsches besser zu verstehen, ist es wichtig, das Volumen des gerutschten Erdreichs zu erfassen. Um das zu berechnen, wird auf dem Orthophoto manuell ein Erdrutschpolygon gemalt. Das Orthophoto mit markiertem Erdrutschgebiet ist in

Abbildung 6.16 zu sehen. Die Fläche von dem gewählten Polygon beträgt 173802 Quadratmeter.



Abbildung 6.16: Orthophoto mit markiertem Erdrutschgebiet

Die Differenzen zwischen DOM aus 3K-Kamera und SRTM innerhalb dieses Polygons werden in Abbildung 6.17 dargestellt. Es gibt positive Differenzen, da im linksoberen markierten Gebiet kein Erdrutsch gibt. (siehe Abbildung 6.15) Die Summe der negativen Differenzen ist das Volumen der Erde, das in den See abgerutscht ist. Dieses Volumen beträgt 1.43 Millionen Kubikmeter.

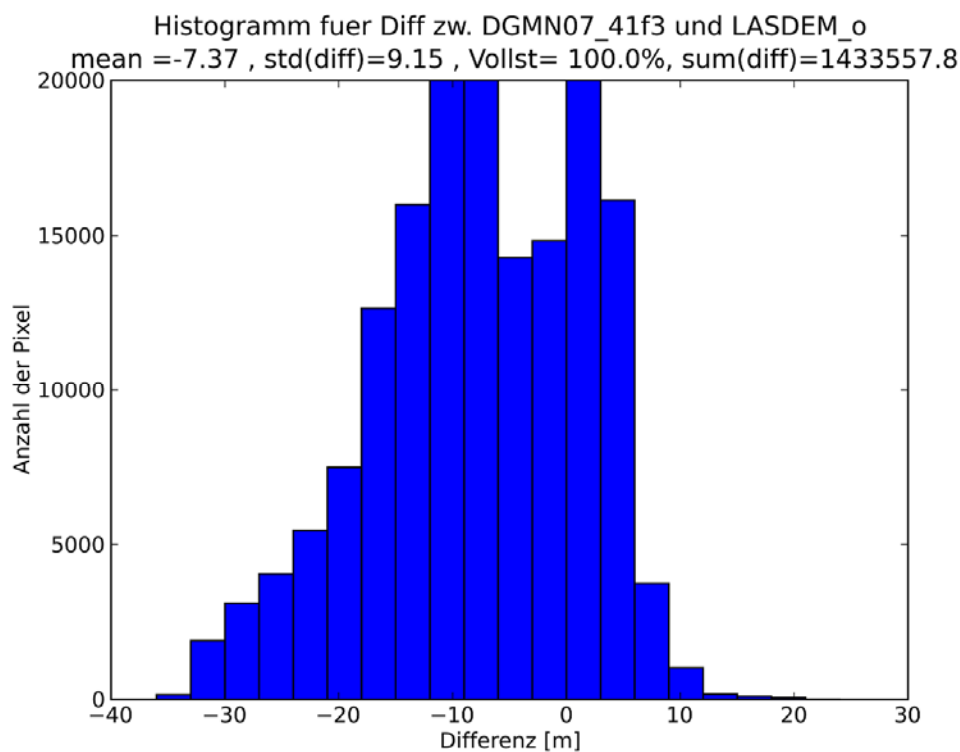


Abbildung 6.17: Histogramm von den Differenzen der beiden DOM im Erdrutschgebiet

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit wird eine Methode für die Generierung von 3D Oberflächenmodellen aus Luftbildsequenzen vorgestellt. Dies umfasst die gesamte Prozesskette von der Bildaufnahme bis zur Berechnung des DOMs. Hauptbestandteile der Prozesskette sind hierbei die Epipolarbild-Generierung und die Pixelzuordnung mittels Semi-Global-Matchings (SGM).

Diese Methode wurde an die Bilder des DLR-3K-Kamerasystems angepasst und untersucht. Bis auf SGM habe ich alle Programme selbst geschrieben.

Im Folgenden wird die gesamte Prozesskette kurz erläutert. Zeitgleich mit der Aufnahme werden die Navigationsdaten mittels GPS- und IMU-System erfasst. Danach werden die Bilder mit Hilfe der kalibrierten Parameter der inneren Orientierung bzgl. der radialsymmetrischen Verzeichnung korrigiert. Unter Verwendung der Epipolargeometrie werden die Bilder dann zu Epipolarbildpaaren konvertiert um den Suchbereich der Pixelzuordnung auf gleiche Spalten einzuschränken. Das Semi-Global-Matching-Verfahren verwendet die Epipolarbildpaare und liefert ein Disparitätsbild als Matchingergebnis. Mit einem räumlichen Vorwärtsschnitt werden die 3D Objektpunktkoordinaten berechnet. Durch Fusion der Punktwolken mehrerer Bildpaare (optional) und anschließende Interpolation wird das endgültige DOM erzeugt.

Bei dieser Diplomarbeit wurden drei Datensätze wie folgt verwendet.

Der Datensatz „München Zentrum“ wurde mit dem 3K Kamerasystem mit sehr hoher Aufnahmerate aufgenommen und wird für die Untersuchung der Fusionierung verschiedener Höhenmodelle und die Analyse der absoluten Genauigkeit der DOMs verwendet. Für die DOM-Generierung im Stadtgebiet wurde eine Basislänge zwischen Nachbarbildern von 105m bis 210m als empfehlenswert berechnet. Die so generierten DOME besitzen dann sowohl eine relativ gute Vollständigkeit als auch eine hohe Genauigkeit.

Die Datensätze „Vaihingen-Enz“ bestehend aus 3K Kamera, Ultracam-X und DMC Bildern wurden in dem DGPF- Testgebiet aufgenommen. Die äußeren Orientierungen der Bilder wurden mittels Bündelblockausgleichung bestimmt und sind damit sehr genau. Diese Datensätze wurden in dieser Diplomarbeit für die Untersuchung der relativen Genauigkeit und für den Vergleich der einzelnen Kamerasysteme verwendet. Zusätzlich wurde ein Vergleich der Prozesskette mit anderem Verfahren (MATCH-T) durchgeführt.

Auf dem Testgebietes Sportplatz betrug die relative Genauigkeit der aus einem Ultracam-X Bildpaar mit 8cm GSD berechneten 3D Punktwolke 15.09 cm. Nach der Fusionierung der Punktwolke aus Bildpaaren der gleichen Streifen senkt sich der Wert zu 7.06 cm. Die Ergebnisse der Fusionierung aller Bildkombinationen zeigen eine deutliche Verbesserung der Standardabweichung (3.87 cm), sind jedoch in der Praxis wegen des stark erhöhten Rechenaufwandes nicht für die Auswertung größerer Gebiete geeignet. Relative Genauigkeit der MATCH-T Ergebnisse beträgt 6.84 cm. Mit SGM konnte jedoch in allen Fällen eine wesentlich höhere Punktdichte (152.52 Pkte/m<sup>2</sup>) erreicht werden. Die Ergebnisse aus DLR 3K-Bilder ist im Vergleich zu den Werten der DMC-Bilder relativ schlecht. Das 3K Kamerasystem verwendet kostengünstige, nicht-metrische Kameras und wurde für Echtzeitanwendungen konzipiert. Deshalb können die Ergebnisse nicht direkt mit metrischen Kameras wie der DMC verglichen werden.

Der Datensatz „Nachterstedt“ wurde für Erdrutschgebiet in Sachsen-Anhalt am 22.07.2009 aufgenommen. Dieser Datensatz ist als Anwendungsbeispiel für die Rettungskräfte generiert worden. Die generierten DOME sowie das Differenz DOM wurden den Rettungskräften zeitnah zur Verfügung gestellt.

## **7.2 Ausblick**

Um die Genauigkeit der DOM weiter zu verbessern, ist eine Kalibrierung der inneren Orientierung mit vollen Parametern notwendig. Da die Genauigkeit des IMU-Systems nicht so hoch ist demzufolge die Genauigkeit der Epipolarbilder auch niedriger. Man könnte mittels robusten Matchingsverfahren einige Verknüpfungspunkte extrahieren und damit mittels Bündelblockausgleichung die äußeren Orientierungsparameter verbessern. Dies gewährleistet dann, dass die Epipolarbildpaare mit höherer Genauigkeit richtig generiert werden.

Das finale Ziel des ARGOS-Projekt ist eine Echtzeit System für Generierung der Oberflächenmodell zu entwickeln. Die in diese Diplomarbeit entwickelt Programme können voll automatisch durchgeführt werden, die Prozessierung dauert aber mit bisherige Arbeitsumgebung für ein Bildpaar ca. 11 Minuten. Ein Einsatz von Graphikkarte (GPU) oder anderer schneller Hardware wäre notwendig für den echtzeitigen Bedarf.

## Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mit Ihrer Unterstützung zum Erfolg meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Dr.-Ing. Franz Kurz und Dr. -Ing. Pablo d'Angelo vom Institut für Methodik der Fernerkundung für die Bereitstellung des Diplomarbeitsthemas, ihre Betreuung während der Bearbeitung und das Korrekturlesen.

Bedanken möchte ich mich herzlich beim apl. Prof. Norbert Haala vom Institut für Photogrammetrie, für die Betreuung dieser Arbeit und die interessanten Vorlesungen im Fach „Digitale Geländemodelle“, die mich zu dieser Diplomarbeit motivieren.

Ich danke allen Mitarbeitern der Abteilung Photogrammetrie und Bildanalyse, insbesondere Dr. Peter Reinartz, der es mir ermöglichte meine Diplomarbeit am Institut für Methodik der Fernerkundung zu schreiben. Dr. Danielle Hoja danke ich für die Korrektur einiger Abschnitte.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und Schwestern, die mich auf meinem Werdegang unterstützt haben.



## Anhang A: Koordinatensystemen und Transformationen

### Pixelkoordinatensystem (p-System)

Ursprung: Zentrum des linken, oberen Pixels.

x-Achse: nach Bild unten, in Zeilen-Richtung

y-Achse: nach rechts, in Spalten-Richtung

### Bildkoordinatensystem(b-System)

Ursprung: Bildzentrum,  $((\text{Anzahl der Zeilen}-1)/2, (\text{Anzahl der Spalten}-1)/2)$  in

Pixelkoordinatensystem

x-Achse: nach Bild oben

y-Achse: nach Bild links

z-Achse: rechtshändig

### Plattformkoordinatensystem (f-System)

x-Achse: in Flugrichtung

y-Achse: in Flugrichtung links

z-Achse: nach oben

### IMU-Plattformkoordinatensystem (i-System)

x-Achse: in Flugrichtung

y-Achse: in Flugrichtung rechts

z-Achse: rechtshändig, nach unten

### lokal-level Koordinatensystem (n-system)

Ursprung: IMU-Zentrum

x-Achse: nach Nord-Richtung

y-Achse: nach Ost-Richtung

z-Achse: nach Unten, parallel zum ellipsoidischen Normal

### UTM: (u-System)

Projektionskoordinatensystem, Ursprung liegt jeweils in Erdäquator, verschneidet mit Bezugsmeridian.

x-Achse: nach Ost

y-Achse: nach Nord

z-Achse: nach oben, ellipsoidischen Normal

Bezeichnung:

$C_b^p$  transformiert von Bildkoordinaten (b-System) in das Pixelkoordinatensystem (p-System).

$x''$  ist der Koordinatenvektor in u-System,  $x_1''$  bedeutet die x-Koordinate

Alle Drehungen im mathematisch positiven Sinn (entgegen Uhrzeigersinn – Rechte-Handregel)

$$R_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, R_2(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, R_3(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

### Transformation: Pixelkoordinatensystem (p-System) zu Bildkoordinatensystem (b-System)

$$C_p^b = R_3(\pi)$$

$$x^b = C_p^b x^p + \begin{bmatrix} (Anzahl\_Zeilen-1)/2 \\ (Anzahl\_Spalten-1)/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

$$\begin{bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1^p \\ -x_2^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (Anzahl\_Zeilen-1)/2 \\ (Anzahl\_Spalten-1)/2 \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

Zum Beispiel: Der linke, obere Punkt in p-System ist (0,0), in b-System ist dann  $((Anzahl\_Zeilen-1)/2, (Anzahl\_Spalten-1)/2)$

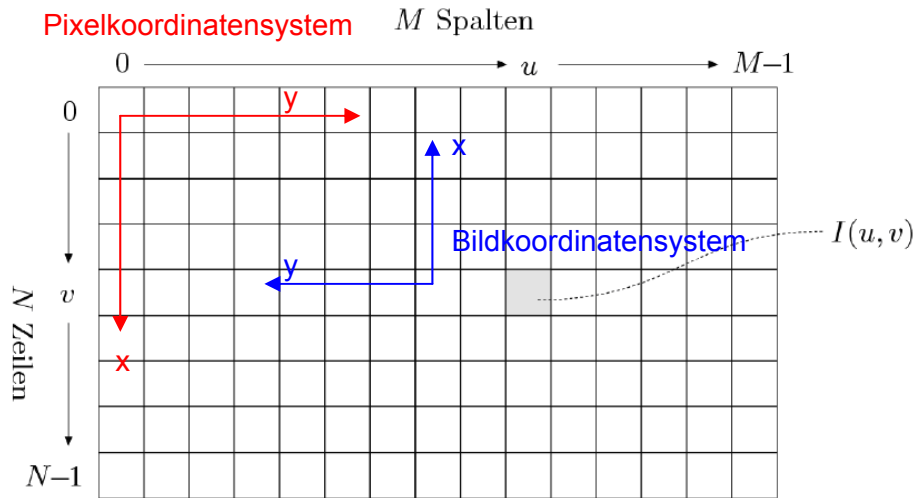


Abbildung A.1: Zusammenhang zwischen Pixel- und Bildkoordinatensystem

#### Transformation: Bild (b-System) zu Plattformkoordinatensystem (f-System)

Die Boresichtwinkel beschreiben die Rotation zwischen Bildebene und Plattform.

Rollbor ist so definiert, dass von Bildkoordinaten zu Horizontalebene um die x-Achse rotiert, ein positiver Rollbor Wert bedeutet, dass sich die linke Seite des Bildes nach oben bewegen. (z.B. unteres Bild Rollbor = - 26°)

Rotation um  $b_1$  Achse mit Winkel Rollbor

Rotation um  $b_2$  Achse mit Winkel Pitchbor

Rotation um  $b_3$  Achse mit Winkel Yawbor

$$C_b^f = R_3(yawbor)R_2(pitchbor)R_1(rollbor) \quad (A.4)$$

#### Transformation von Plattformsystem (f-System) zu IMU-Navigationskoordinaten(i-System)

Rotation um  $f_1$  Achse mit Winkel 180°:  $C_f^i = R_1(\pi)$

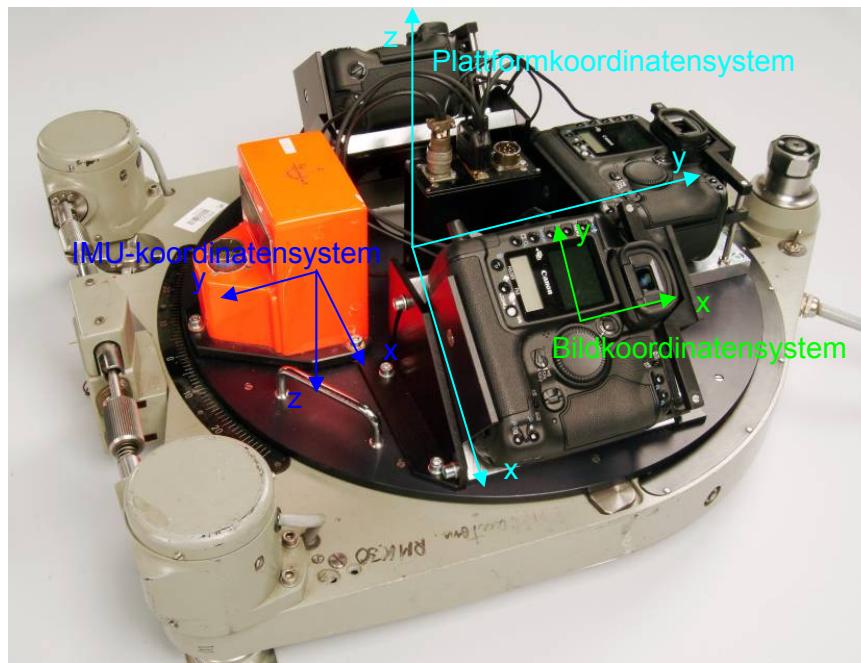


Abbildung A.2: Zusammenhang zwischen Bild-, Plattform- und IMU-koordinatensystem

### Transformation von IMU-Navigationssystem(i-System) zum Lokal-levelsystem(n-System)

Roll: Drehung von lokaltangentiale Ebene um Flugrichtung

$$C_i^n = R_3(-Yaw)R_2(-Pitch)R_1(-Roll) \quad (A.5)$$

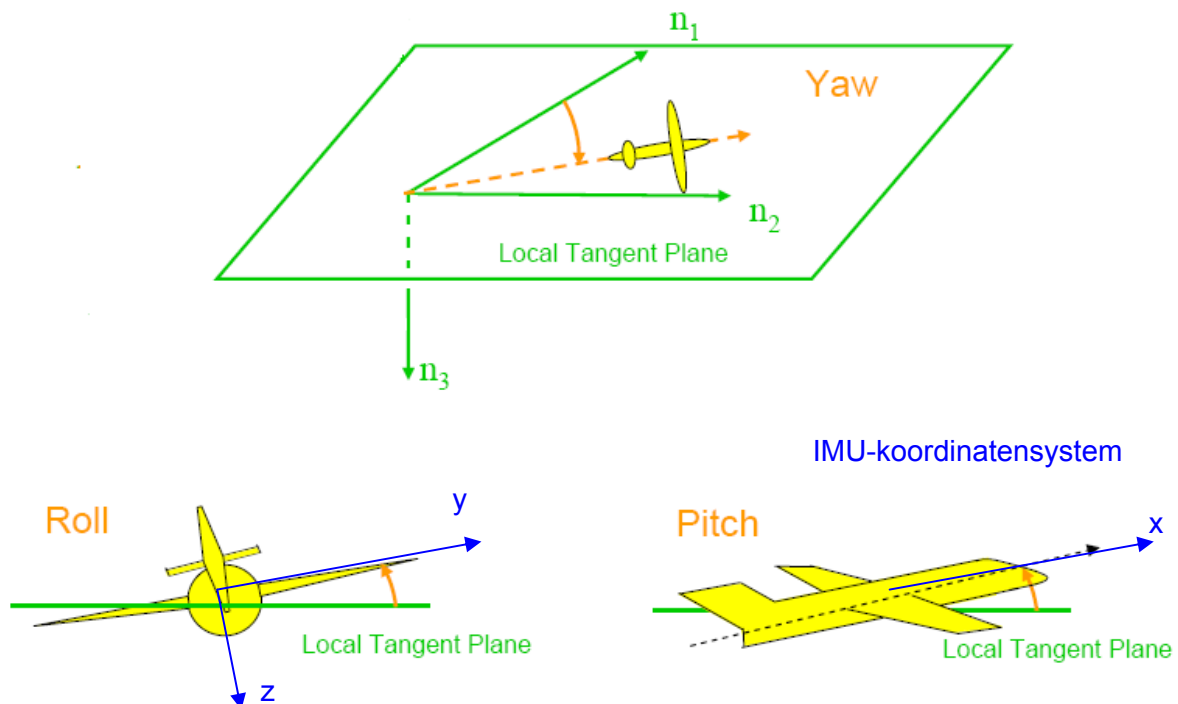


Abbildung A.3: Zusammenhang zwischen IMU- und Lokal-levelkoordinatensystem

**Transformation von Lokal-levelsystem (n-System) zu UTM-System (u-System)**Rotation um  $n_1$  Achse mit Winkel  $180^\circ$ Rotation um  $n_3$  Achse mit Winkel  $-90^\circ$ 

$$C_n^u = R_3(-\pi/2)R_1(\pi) \quad (\text{A.6})$$

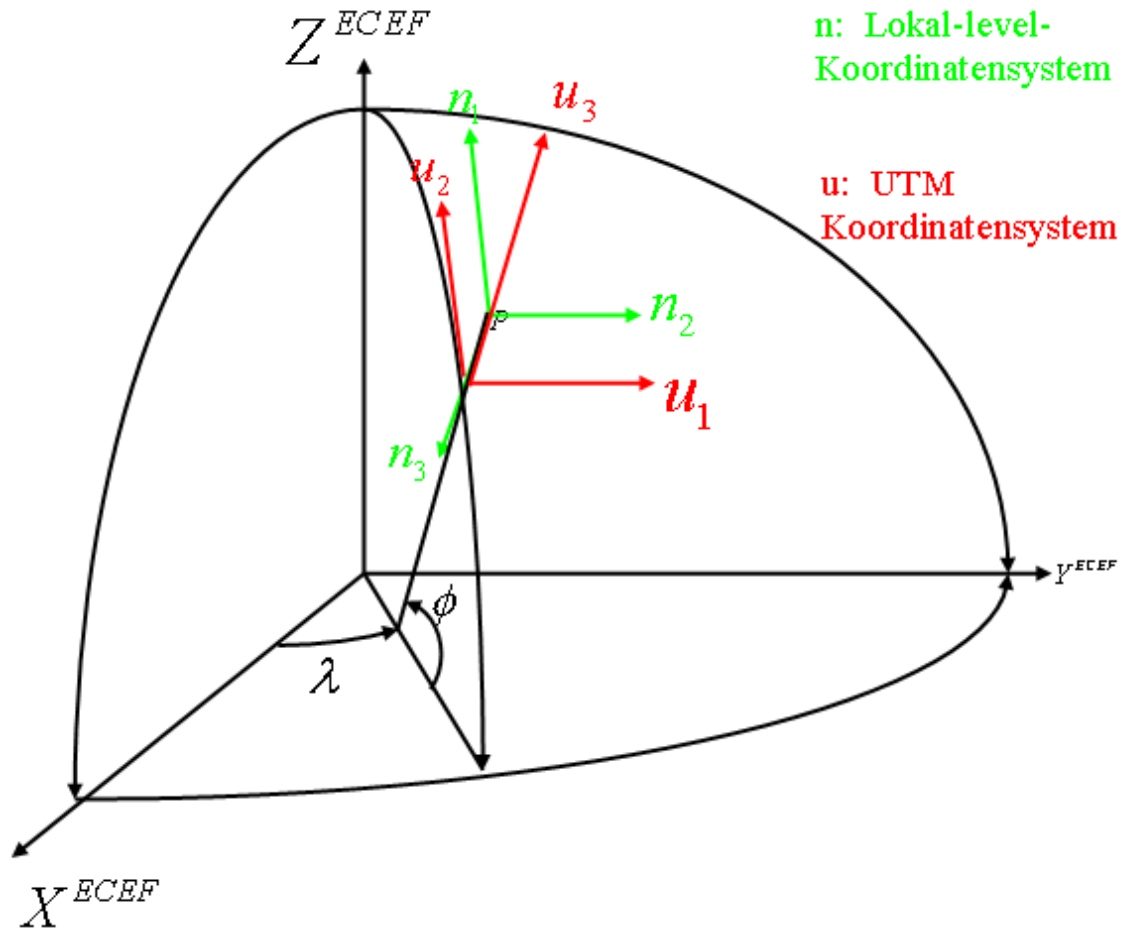


Abbildung A.4: Zusammenhang zwischen Lokal-level- und UTM-Koordinatensystem

Insgesamt ist die Rotationsmatrix von Bildkoordinatensystem (b-System) zu UTM-Koordinatensystem(u-System):

$$C_b^u = R_3(-\pi/2)R_1(\pi)R_3(-Yaw)R_2(-Pitch)R_1(-Roll)R_1(\pi) \cdot R_3(yawbor)R_2(pitchbor)R_1(rollbor) \quad (\text{A.7})$$

## Anhang B: Format der Ein- und Ausgabedateien

### Format \_interior

Die Datei „\_interior“ enthält die Parameter der Innere Orientierung eines Bildes. Es besteht aus insgesamt 9 Elemente und Zeilenweise gespeichert. Die Bedeutung der Werte wird in Abschnitte 2.2 und 3.2 beschrieben.

Zeile	Variable	Beschreibung	Einheit	Typ
1	nr_cols	Anzahl der Spalte	-	Integer
2	nr_rows	Anzahl der Zeile	-	Integer
3	c	Kamerakonstante	m	double
4	A1	Radiaverzeichnung		double
5	A2	Radiaverzeichnung		double
6	x0	Hauptpunktkoordinaten	m	double
7	y0	Hauptpunktkoordinaten	m	double
8	R0	2.Nulldurchgang		double
9	PS_A	Pixelsize	m/Pixel	double

Tabelle B.1: Format der Datei „\_interior“

### Format \_exterior

Die Datei „\_exterior“ enthält die 6 Parameter der äußere Orientierung eines Bildes. Die Elemente sind folgendes:

Zeile	Variable	Beschreibung	Einheit	Typ
1	omega	Drehwinkel um x-Achse	Grad	double
2	phi	Drehwinkel um y-Achse	Grad	double
3	kappa	Drehwinkel um z-Achse	Grad	double
4	X0	Koordinaten der Projektionszentrum in Objektkoordinatensystem	m	double
5	Y0		m	double
6	Z0		m	double

Tabelle B.2: Format der Datei „\_exterior“

$\omega(\omega)$ ,  $\varphi(\varphi)$ ,  $\kappa(\kappa)$  sind die Drehwinkel vom Bildkoordinatensystem zum Objektkoordinatensystem. Die sind entgegen dem Uhrzeigersinn mathematisch positiv definiert. Entsprechende Formel lautet:

$$\vec{X} = R\vec{x} = R_3(\kappa)R_2(\varphi)R_1(\omega)\vec{x} \quad (\text{B.1})$$

$$\begin{aligned}
 R_1(\omega) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}, \\
 \text{Wobei, } R_2(\varphi) &= \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}, \\
 R_3(\kappa) &= \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

Dann gilt:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix} \tag{B.3}$$

Durch die erste Spalte und dritte Zeile von Matrix R lassen sich einfach die drei Winkel berechnen:

$$\omega = \arctan\left(\frac{-R_{3,2}}{R_{3,3}}\right), \quad \varphi = \arcsin(R_{3,1}), \quad \kappa = \arctan\left(\frac{-R_{2,1}}{R_{1,1}}\right) \tag{B.4}$$



## Anhang C: Datenfluss und Programme

Nr.	Programme	Eingabe	Ausgabe	Typ
1.1	unradial.c	N0389	UNRADN0389	c
1.2	epipolar.py	UNRADN0389 UNRADN0390	EPIN0389_N0390 EPIN0390_N0389	python
1	unradial_epipolar.py	N0389 N0390	EPIN0389_N0390 EPIN0390_N0389	python
2	minmaxdisp.py	EPIN0389_N0390 EPIN0390_N0389	mindisp, maxdisp	Python
3	sgm	EPIN0389_N0390 EPIN0390_N0389	SGMN0389N0390	Xdibias
4	vorwaertsschnittc.py	SGMN0389N0390	P3DN0389N0390.txt	python
5	rasterobko	P3DN0389N0390.txt	DGMN0389N0390	python

Tabelle C.1: Ein- und Ausgabe der Programme

Nr.	Datei	Beispiel	Verwendete Dateien
1	Ursprüngliches Bild	N0389	_img, _nav
1.2	Korrigiertes Bild	UNRADN0389	_img, _interior, _nav
2	Epipolarbildpaar	EPIN0389_N0390 EPIN0390_N0389	_img, _interior, _exterior
3	Disparitätsbild	SGMN0389N0390	_img
4	Koordinatenfile	P3DN0389N0390.txt	PktNr X Y Z [arr]
6	DOM	DGMN0389N0390	_img

Tabelle C.2: Beschreibung der Zwischenergebnisse

In folgenden Text werden die Dateien für Zwischenergebnisse eingerückt dargestellt und die verwendete Programme nicht.

### 1: Ursprüngliches Bild

Verwendete Dateien:

\_img, \_interior(Binär), \_nav

Beispiel

N0389

### 1.1: unradia.c: radiale Verzerrung korrigieren

Eingabe:

N0389 ( \_img, \_interior(Binär) )

Ausgabe:

UNRADN0389(\_img, \_interior)

### 1.2: Korrigiertes Bild

Verwendete Dateien:

\_img, \_interior, \_nav

Beispiel

UNRADN0389

**1.2: epipolar.py: Epipolarbildpaar generieren**

Eingabe:

```
UNRADN0389 ( _img, _interior, _nav) ,
UNRADN0390 ( _img, _interior, _nav)
trafo from Geographic to UTM_Zone32_North, um die Koord. der
Projektionszentrum zu berechnen
boresight.txt
```

Ausgabe:

```
EPIN0389_N0390 ( _img, _interior, _exterior)
EPIN0390_N0389 ( _img, _interior, _exterior)
```

**1: unradial\_epipolar.py: Epipolarbildpaar generieren (direkt aus ursprüngliche Bilder)**

Eingabe:

```
N0389 ( _img, _nav )
N0390 ( _img, _nav)
Kalibrierungsdatei für innere Orientierung (interior.txt)
Kalibrierungsdatei für boresight Winkel (boresight.txt)
trafo from Geographic to UTM_Zone32_North, um die Koord. der
Projektionszentrum zu berechnen
```

Ausgabe:

```
EPIN0389_N0390 ( _interior, _exterior)
EPIN0390_N0389 ( _interior, _exterior)
```

**2: Epipolarbildpaar**

Verwendete Dateien:

```
_img, _interior, _exterior
Beispiel
EPIN0389_N0390, EPIN0390_N0389
```

**2: minmaxdisp.py**

Eingabe:

```
EPIN0389_N0390 ( _interior, _exterior)
EPIN0390_N0389 ( _interior, _exterior)
Zmean (geschätzte mittlere Höhe des Geländes)
Zabw (die maximale Abweichung der Geländehöhe zu Zmean)
```

Ausgabe:

```
mindisp, maxdisp
```

**3: sgm(Xdibias Modul): Disparitätsbild generieren**

Eingabe:

```
Ein Kanal vom Epipolarbildpaar (normaleweise Kanal 2, grün)
EPIN0389_N0390(_img)
EPIN0390_N0389 (_img)
mindisp, maxdisp (aus Programm minmaxdisp.py)
```

roi(xstart, ystart, width, height) (ausgewählte Fenster für SGM)  
von (0,0) aus xstart nach rechts, ystart nach unten, width nach rechts, height nach unten. Z.B.(500, 1000, 1600, 1800) ( anschaulich in EPIN0389\_N0390)  
(alle andere Parameter sollte vorher definieren und je nach dem Gebiet unterschiedlich)

Ausgabe:

SGMN0389N0390 (\_img)

### 3: Disparitätsbild: ( $d = x1 - x2$ )

Verwendete Dateien:

\_img (gleiche Größe wie das erste Epipolarbild EPIN0389\_N0390)

Beispiel:

SGMN0389N0390

### 4: vorwaertsschnittc.py: Koordinaten von 3D-Punkte berechnen

Eingabe:

EPIN0389\_N0390 (\_interior, \_exterior)

EPIN0390\_N0389 (\_interior, \_exterior)

mindisp, maxdisp (gleiche benutzte Eingabe in SGM)

roi(xstart, ystart, width, height) (ausgewählte Fenster für SGM)

Ausgabe:

P3DN0389N0390.txt (in local.file gespeichert)

### 4: Koordinatenfile für 3D-Punkte

Verwendete Dateien:

Textdatei ( Zeilenweise Punktnr X Y Z [Genauigkeit( optional )] )

Beispiel:

P3DN0389N0390.txt

### 5: rasterobko.py: Darstellung des DOMs aus Punktwolke

Eingabe:

P3DN0389N0390.txt (in /home/tao/lf/muc\_dem local.file)

extend (linksobere und rechtsuntere koordinaten von Referenz-DGM, hier LASDEM)

resolution ( Auflösung des DOMs ) z.B. (1 1)

Ausgabe:

DGMN0389N0390(\_img)

### 5: DOM (Bildformat)

Verwendete Datei::

\_img

Beispiel:

DGMN0389N0390

Weitere Programme und Dateien für die Bewertung des DOMs**dem3dshift(Xdibias Modul): 3 Translationsparameter berechnen, Punktfiler korrigieren**

Eingabe:

P3DN0389N0390.txt  
LASDEM (Referenz DOM)

Ausgabe:

X0,Y0,Z0

Optional:

P3DN0389N0390\_k.txt (keine Ausreißer und alle Punkte mit X0, Y0, Z0 korrigiert)

**DGMadd.py: Punktfiler mit den 3 Translationen korrigieren**

Eingabe:

P3DN0389N0390.txt

Ausgabe:

P3DN0389N0390\_kadd.txt

**DGMvergleich.py: Vergleich eines DOMs mit Referenz DOM**

Eingabe:

LASDEM(\_img)  
DGMN0389N0390(\_img)

Ausgabe:

DGMN0389N0390\_vergl.png

**Höhendifferenzfile für ausgewählten Bereich**

Verwendete Datei:

( Zeilenweise höhendifferenz )

In letzte Zeilen werden statistische Werten angegeben( max, min, mean, std )

Beispiel:

DifDGMN0389N0390.txt

**obko.find.minmax (shell Befehl): die größte Werte in Datei suchen**

Eingabe:

P3DDGMN0389N0390.txt

Ausgabe:

die maximalen und minimalen Werte von X, Y, Z

**stretch(Xdibias Modul): Ausdehnung der Grauwerten im DOM**

Eingabe:

min max von Z aus obko.find.minmax  
DGMN0389N0390

Ausgabe:

strDGMN0389N0390(\_img)

## Literaturverzeichnis

- [1] Kurz, F., Müller, R., Stephani, M., Reinartz, P., Schroeder, M., 2007: „Calibration of a wide-angle digital camera system for near real time scenarios“. In: ISPRS Hannover Workshop 2007, High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, 2007-05-29-06-01, ISSN 1682-1777.
- [2] Kurz, F., (2009): „Accuracy assessment of the DLR 3K camera system“. DGPF Tagungsband (digitale Version) 18/2009.
- [3] Kurz, F., Rosenbaum, D., Thomas, U., Leitloff, J., Palubinskas, G., Zeller, K., Reinartz, P., 2009: „Near real time airborne monitoring system for disaster and traffic applications“. ISPRS Commission IV WG 3. URL: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII-1-4-7\\_W5/paper/Kurz-131.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII-1-4-7_W5/paper/Kurz-131.pdf)
- [4] Cramer, M., (2008): „Bildaufzeichnung und Monoplotting“. Teil 05, Testfeldkalibrierung Vorlesungsskript im WS 08/09, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart.
- [5] Falcom GmbH: „CamFolder-Kamera-Kalibrierung“, URL: <http://www.falcon.de/falcon/pdf/ger/manual/CamFolder.pdf>. Seite 25.
- [6] Fusiello, A., Trucco, E., and Verri, A. (2000): „A compact algorithm for rectification of stereo pairs“. Machine Vision and Applications, 12(1):16-22, 2000.
- [7] Brown, C. L. T. (2004): „Epipolar Geometry and the Fundamental Matrix“. Technical White Paper, Technology Pathways, 12. Oktober 2004.
- [8] Duraiswami, R. (2000): „Epipolar Geometry and the Fundamental Matrix“, URL: <http://www.umi.acs.umd.edu/~ramani/cmsc828d/lecture27.pdf>
- [9] Tao, J. (Jan. 2009): „Robuste Zuordnung von Merkmalspunkten in ebener Objekte“. Studienarbeit, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart.
- [10] Böhm, J. (2007): „Nahbereichsphotogrammetrie“. Vorlesungsskript im WS 07/08, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart.
- [11] Wikipedia (09/2009): Suchbegriffe „Stereonormalfall“, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stereonormalfall>
- [12] Kraus, K. (1994): „Photogrammetrie, Band 1, Grundlagen und Standardverfahren“. Dümmler, Bonn, Seite 14, 15, 27, 115, 280.
- [13] Hirschmüller, H. (2008): „Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information“. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.30, no.2, pp. 328-341, Feb.2008, doi: 10.1109/TPAMI.2007.1166
- [14] CRAMER, M., KRAß, H., JACOBSEN, K., VON SCHÖNERKARK, M., JAAJA, N. & SPRECKELS, V., 2008: Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme, DGPF Tagungsband 18/2009.
- [15] HAALA, N. & WOLFF, K., 2009: Digitale photogrammetrische Luftbildkamerasysteme – Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen, DGPF Tagungsband 18/2009, Jahrestagung DGPF Jena.

- [16] DGPF (08/2009): Datensätze, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/DKEP-Dat.html>
- [17] Spiegel online (08/2009): Erdbeben reißt zwei Häuser mit, URL: <http://www.spiegel.de/fotostrecke/fotostrecke-44499.html#backToArticle=636933>
- [18] Flugrevue (08/2009): Flugzeug Cessna Caravan, URL: <http://www.flugrevue.de/de/technik/technik/dlr-unterstuetzt-mit-luftbildern-untersuchung-nach-erdbeben-in-nachterstedt.12701.htm>
- [19] Wikipedia (08/2009): Suchbegriffe „SRTM“, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/SRTM-Daten>
- [20] Seeland (08/2009): Wasserstand von Concordia See, URL: <http://www.seeland.de/>
- [21] Dlr.de (08/2009): Hochgenaue Luftbilder des Nachterstedter Erdbebengebiets, URL: [http://www.dlr.de/DesktopDefault.aspx/tabid-1/86\\_read-18849](http://www.dlr.de/DesktopDefault.aspx/tabid-1/86_read-18849)
- [22] Wikipedia (09/2009): Suchbegriffe „Inverse Distanzwichtung“, URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Inverse\\_Distanzwichtung](http://de.wikipedia.org/wiki/Inverse_Distanzwichtung)
- [23] Wikipedia (09/2009): Suchbegriffe „Epipolarometrie“, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Epipolarometrie>
- [24] Ries, C., Kager, H., Stadler, P. (2002): GPS/GPS/IMU-unterstützte Georeferenzierung der Daten flugzeuggetragener multispektraler Scanner. 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung 2002, 24.09.-26.09.02 Neubrandenburg, in Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 11, S. 59 - 66.
- [25] Cramer, M., (2009): Digital Airborne Camera Performance – The DGPF Test, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo09/080Cramer.pdf>
- [26] Hartley, R., Zisserman, A., (2000): „Multiple View Geometry in Computer Vision“, Cambridge University Press, ISBN: 0521623049.



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Auflistung der inneren Orientierungsparameter vom Jahr 2006 und 2008 (Tabelle aus [2] entnommen) .....	4
Tabelle 3.1: ein Ergebnis der inversen Funktion für radialsymmetrische Verzeichnung .....	13
Tabelle 4.1: Zusammenhang zw. Basislänge, sichtbaren Bereich und Genauigkeit des DOMs .....	37
Tabelle 4.2: Zusammenhang zw. Basislänge, sichtbaren Bereich, Genauigkeit des DOMs und Straßenbreite (Gebäudehöhe 30m) .....	37
Tabelle 4.3: Laufzeit jeweiliger Schritte .....	38
Tabelle 4.4: Statistische Untersuchung der Ergebnisse der Fusionierung (Nadir Bilder) .....	49
Tabelle 4.5: Statistische Untersuchung der Ergebnisse der Fusionierung (rückwärtsblickende Bilder) .....	49
Tabelle 5.1: Genauigkeitsuntersuchungen für die abgeleiteten 3D Punktwolken .....	63
Tabelle 5.2: Genauigkeitsuntersuchungen für die fusionierten 3D Punktwolken .....	63
Tabelle B.1: Format der Datei "_interior" .....	85
Tabelle B.2: Format der Datei "_exterior" .....	85
Tabelle C.1: Ein- und Ausgabe der Programme .....	87
Tabelle C.2: Beschreibung der Zwischenergebnisse .....	87

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: DLR 3K-Kamerasystem (Graphik aus [1] entnommen).....	2
Abbildung 2.2: Die Mikrowelle Antenne (links) und die mobile Bodenstation (rechts) (Graphik aus [3] entnommen) .....	3
Abbildung 2.3: Die Geometrie der Bildaufnahme (Graphik aus [2] entnommen) .....	3
Abbildung 2.4: Die effektiven Boresightwinkel Roll, Pitch und Yaw für jedes Bild und jede Kamera (Graphik aus [2] entnommen).....	5
Abbildung 2.5: Der XDibias Image Administrator .....	6
Abbildung 2.6: XDibias Bildprozessierungsmodule .....	7
Abbildung 2.7: Die Visualisierungseinheit IDbias .....	7
Abbildung 3.1: Flussdiagramm des ganzen Projektes .....	9
Abbildung 3.2: Auswirkung der 3 Parameter der radialsymmetrische Verzeichnung (Graphik aus [10] entnommen) .....	10
Abbildung 3.3: Radialsymmetrische Verzeichnung mit einem zweiten Nulldurchgang (Graphik aus [2] entnommen) .....	11
Abbildung 3.4: Radialsymmetrische Verzeichnung .....	12
Abbildung 3.5: Epipolargeometrie (Graphik aus [8] entnommen).....	14
Abbildung 3.6: Transformation der Objektkoordinaten $\vec{X}_p$ vom übergeordneten Koordinatensystem $\vec{X}$ zum Kamerakoordinatensystem $\vec{x}'$ (Graphik aus [10] entnommen).....	15
Abbildung 3.7: Beziehung der ursprüngliche Bildpaare und Epipolarbilder .....	16
Abbildung 3.8: Flussdiagramm für Generierung von Epipolarbilder .....	21
Abbildung 4.1: Beflug in der innere Stadt München .....	28
Abbildung 4.2: Orthophoto des Beflugs in der innere Stadt München .....	29
Abbildung 4.3: Genauigkeit der Objektpunktkoordinaten abhängig von der Basislänge.....	32
Abbildung 4.4: Genauigkeit der Objektpunktkoordinaten abhängig von Pixelpositionen .....	33
Abbildung 4.5: Geometrie für die Vollständigkeitsuntersuchung ( Beide Projektionszentren liegen nicht direkt über Straße) .....	34
Abbildung 4.6: Geometrie für die Vollständigkeitsuntersuchung (weitere Bildpaare).....	35
Abbildung 4.7: Geometrie für Vollständigkeitsuntersuchung (ein Projektionszentrum liegt direkt über Straße) .....	36
Abbildung 4.8: die ursprünglichen Bilder N0388 und N0391.....	39
Abbildung 4.9: Die Epipolarbildpaar (mit IDibias software dargestellt).....	39
Abbildung 4.10: Disparitätsbild (für Bildpaar N0388, N0391).....	40
Abbildung 4.11: Das digitale Oberflächenmodell (aus Bildpaar N0388 N0391).....	41
Abbildung 4.12: Differenzbild, DOM aus 3K – DOM aus Laserdaten.....	41
Abbildung 4.13: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355 und B0359 .....	42
Abbildung 4.14: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355, B0356 .....	42
Abbildung 4.15: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355, B0357 .....	43
Abbildung 4.16: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355, B0359 .....	43
Abbildung 4.17: DOM und Differenzbild aus Bildpaar B0355, B0371 .....	43
Abbildung 4.18: Translation sowie die Standardabweichung der Differenzen zwischen DOM aus 16 Bildpaare und DOM aus Laserdaten .....	44
Abbildung 4.19: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode1: Maximum) .....	45

Abbildung 4.20: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode2: Minimum) .....	46
Abbildung 4.21: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode3: Mittelwert).....	46
Abbildung 4.22: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode4: Gewichteter Mittelwert).....	47
Abbildung 4.23: Ergebnis der Fusionierung aus B0355-B0371 (Mode5: Werte mit bester Genauigkeit).....	47
Abbildung 4.24: DOM und Differenzbild aus Bildpaar N0388, N0393 .....	48
Abbildung 4.25: DOM und Differenzbild des fusionierten DOM .....	48
Abbildung 5.1: Orthophoto für das Testgebiet Vaihingen-Enz aus 3K-Daten mit verfügbarem Referenz-DOM und markierten Untersuchungsbereichen .....	53
Abbildung 5.2: Ausschnitt aus Ultracam-X Bild (8cm GSD) für die Häuserreihe .....	54
Abbildung 5.3: Referenz DOM aus ALS50 Daten der Häuserreihe .....	54
Abbildung 5.4: Visueller Vergleich der DOMs einer Häuserreihe aus ein Bildpaar. Reihenfolge von links nach rechts: Ultracam-X 8cm, DMC 20cm, 3K 20cm; von oben nach unten: DOM 25cm Rasterweite, Differenzbild zu Referenz DOM, Histogramm der Differenzen.....	55
Abbildung 5.5: Visueller Vergleich der fusionierten und gefüllten DOMs einer Häuserreihe. Reihenfolge von links nach rechts: Ultracam-X 8cm, DMC 20cm, 3K 20cm; von oben nach unten: DOM 25cm Rasterweite, Differenzbild zu Referenz DOM, Histogramm der Differenzen.....	56
Abbildung 5.6: Vergleich des Referenz DOM mit DOM der Ultracam-X (8cm GSD) .....	57
Abbildung 5.7: Vergleich des DOMs der DMC 20cm GSD (linkes Bild: mit semiglobal Matching erzeugtes DOM mit 25cm Rasterweite, rechtes Bild: schattiertes DOM erstellt mit Softwarepaket SAT-PP mit 60cm Rasterweite (Graphik aus [15] entnommen)).....	57
Abbildung 5.8: Ein Ausschnitt aus einem Ultracam-X Bild (8cm GSD) zeigt für die Häuserreihe mit Profilverlauf.....	58
Abbildung 5.9: Profile der DOMs für den Bereich Häuserreihe aus Datensätzen ALS 50, Ultracam-X 8cm GSD, DMC 20cm GSD und DLR 3K 20cm GSD.....	58
Abbildung 5.10: Ausschnitt eines Ultracam-X Bild (8cm GSD) für das Testgebiet „Sportplatz“ mit Profilverlauf .....	59
Abbildung 5.11: Referenz DOM aus ALS50 des Sportplatzes .....	59
Abbildung 5.12: Visueller Vergleich der fusionierten und gefüllten DOMs des Sportplatzes. Reihenfolge von links nach rechts: Ultracam-X 8cm, DMC 20cm, 3K 20cm; von oben nach unten: DOM 25cm Rasterweite, Differenzbild zu Referenz DOM, Histogramm der Differenzen.....	59
Abbildung 5.13: Profile der DOMs für den Bereich Sportplatz aus Datensätzen ALS 50, Ultracam-X 8cm GSD, DMC 20cm GSD und DLR 3K 20cm GSD.....	60
Abbildung 5.14: 3D Punkte aus DMC-Bild 20cm GSD .....	61
Abbildung 5.15: Verwendetes DMC-Bild im Bereich des Sportplatzes .....	61
Abbildung 5.16: Punkte im lokalen Koordinatensystem .....	62
Abbildung 5.17: Histogramm des Abstands zur ausgleichenden Ebene.....	62
Abbildung 6.1: Erdrusch in Nachterstedt (Graphik aus [17] entnommen ) .....	65
Abbildung 6.2: Das Forschungsflugzeug Cessna Caravan (Graphik aus [18] entnommen) ..	66
Abbildung 6.3: Ein Original 3K-Bild im Erdruschgebiet .....	67
Abbildung 6.4: Digitales Oberflächenmodell für Erdruschgebiet .....	68
Abbildung 6.5: Orthophoto für Erdruschgebiet .....	68
Abbildung 6.6: DOM ohne Wasserbereich .....	69
Abbildung 6.7: Perspektive Ansicht des DOMs mit Orthophoto .....	70
Abbildung 6.8: Digitales Oberflächenmodell aus SRTM für Erdruschgebiet .....	71

Abbildung 6.9: Bildausschnitt aus Google Earth von Erdrutschgebiet (Aufgenommen im Jahr 2000, ausgeschnitten mit UTM Koordinaten 660875 E, 5742630 N; 662161 E, 5741243 N) .....	71
Abbildung 6.10: visuell überflutete DOM aus SRTM .....	72
Abbildung 6.11: Zusammenstellung der beiden DOM (oben: vor dem Erdrutsch, unten: nach dem Erdrutsch).....	73
Abbildung 6.12: Orthophoto mit markierten Grasgebiet .....	74
Abbildung 6.13: Histogramm von den Differenzen der beiden DOM im Grasgebiet .....	75
Abbildung 6.14: Luftbild-Vergleichskarte Nachterstedt, vorher und nachher (Graphik aus [21] entnommen) .....	75
Abbildung 6.15: Differenzbild, DOM aus SRTM - DOM aus 3K .....	76
Abbildung 6.16: Orthophoto mit markiertem Erdrutschgebiet .....	77
Abbildung 6.17: Histogramm von den Differenzen der beiden DOM im Erdrutschgebiet .....	77
Abbildung A.1: Zusammenhang zwischen Pixel- und Bildkoordinatensystem .....	82
Abbildung A.2: Zusammenhang zwischen Bild-, Plattform- und IMU-koordinatensystem .....	83
Abbildung A.3: Zusammenhang zwischen IMU- und Lokal-levelkoordinatensystem .....	83
Abbildung A.4: Zusammenhang zwischen Lokal-level- und UTM-Koordinatensystem .....	84